



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

KAISA GRIP

PIENASIAKKAAN KYSYNNÄN JOUSTON JA OMAN  
TUOTANNON VAIKUTUKSET KUORMITUSMALLEIHIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta  
Tarkastaja ja aihe hyväksyty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8. toukokuuta  
2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**KAISA GRIP:** Pienasiakkaan kysynnän jouston ja oman tuotannon vaikutukset kuormitusmalleihin

Diplomityö, 69 sivua, 3 liitesivua

Elokuu 2013

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Työn tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: AMR, aurinkopaneeli, kuormitusmalli, kysynnän jousto, tehokaista, älykäs sähköverkko

Älykkäät sähköverkot mahdollistavat laajamittaisemman hajautetun tuotannon ja kysynnän jouston sekä kaksisuuntaisen tiedonsiirron verkkoyhtiön, sähkön myyjän ja asiakkaan välillä. Yksittäisellä sähkön käyttäjällä voi olla omaa pientuotantoa, jonka seurauksena verkosta ostetun sähkön määrä vähenee sekä sähkön myyminen tulee mahdolliseksi. Kysynnän joustolla puolestaan pyritään vähentämään huippukuormituksia ja tasoittamaan sähkön kulutusta sekä siirtämään kuormaa halvemman sähkön tai pienemmän kuorman ajankohtaan.

Tärkeä yksittäinen komponentti älykkään sähköverkon konseptissa on AMR-mittarit, joiden kautta saatava tieto antaa pohjan kuormitusmallien luomiselle. Nykyiset kuormitusmallit eivät kuitenkaan tulevaisuudessa tule antamaan aina riittävän tarkkaa tietoa huippukuormituksista ja niiden ajankohdista sähkökuormien muuttuessa. Nykyisillä malleilla huomioidaan ainoastaan ulkolämpötilan vaikutus kuormitusten suuruuteen. Tulevaisuudessa kuormituksiin vaikuttavat merkittävästi lämpötilan lisäksi esimerkiksi oman tuotannon suuruus, kuormien ohjaus sekä sähköautojen lataus. Kysynnän jouston seurauksena ohjauksen piirissä olevat sähkökuormat siirtyvät eri ajankohtiin kokonaiskuormituksen pysyessä samana. Oman tuotannon käyttöönotto puolestaan vaikuttaa suoraan asiakkaiden verkosta syötettävän tai otettavan sähkötehon suuruuteen. Erityisesti oman tuotannon satunnaisuus aiheuttaa ongelmia kuormitusennusteiden luomiselle.

Eräs mahdollisuus kuormien ohjaamiseen on tehokaista, joka määrittelee kuormitukselle suurimman mahdollisen tehon. Mikäli asiakas ylittää tämän tehorajan, osakuormia ohjataan alemman kuorman ajanhetkille. Lisäksi kuormia voidaan ohjata sähkön spot -hinnan perusteella. Tehokaistaohjaus ei näy välttämättä yksittäisen asiakkaan kuormituksessa merkittävästi. Spot -ohjaus kuitenkin näkyy ohjattavan kuorman siirtymisenä halvemman sähkön ajankohtaan. Tämän siirtymän ennustaminen ei ole mahdollista nykyisillä kuormitusmalleilla, vaan malleihin vaadittaisiin spot -hintoihin perustuva korjaustekijä. Tarkkoja kuormitusmalleja varten tarvittaisiin kuitenkin useampi kuorman ohjauksen piirissä oleva asiakas, joiden mittaustietoja voitaisiin vertailla.

Kuorman ohjauksen lisäksi oman tuotannon, muun muassa aurinkopaneelien, yleistymisen vaikuttaa kuormitusmallien luotettavuuteen. Aurinkopaneelien tuottamalla energialla voidaan kesäaikaan kattaa suuri osa asiakkaan kulutuksesta, etenkin, jos paneelien rinnalle on kytketty akusto. Aurinkopaneelien tapauksessa kuormitusmalleihin vaadittaisiin laskennallinen paneelien tuotantoa kuvaava parametri.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**KAISA GRIP**: Effects of demand response and own production of small-scale customer on load profiling

Master of Science Thesis, 69 pages, 3 Appendix pages

August 2013

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: AMR, demand response, load profiling, power band, smart grid, solar panel

In future smart grids enable two-way data transfer between distribution network and customer. This quality supports more wide scale distributed energy and demand response. Single customer could have own production which decreases purchased electricity and enables selling excessive energy to distribution network. Demand response in turn is trying to decrease load peaks and spread energy consumption and move loads to time when energy is cheapest.

The one essential component in smart grids is AMR meters which are basis for making of load profiles. In future present load profiles aren't accurate enough because electrical load are changing. Present profiles notice only effects of exterior temperature to electrical loads. In future for example demand response, own production and electrical vehicles effect to size of loads. As a result of demand response controllable loads move to different point in time but total load remains the same. Commissioning of own production in turn effects straight on the size of customer's entered or purchased electrical power. Especially randomness of own production causes problems to forecast sizes of electrical loads.

One solution to control loads is power band which defines the biggest value to electrical load, threshold value. If customer exceeds threshold value, algorithm activates controllable loads to be switched off. Loads are returned when customer's consumption goes under hysteresis value. Loads could be controlled also by spot -price of electricity. Differences between normal load and power band controlled load are anyway slight in the studied pilot case. Spot -controlling is seen better than power band in load profiles. This controlling method has moved load to point of time when price is lower. In present load profiles this transition isn't possible to forecast. Profiles would be required to spot -price based on fix factor. More load controlled customers whose measurement could be compared would be needed for accurate load profiles.

Also own production, inter alia solar panels, effects on accuracy of load profiles. In summer solar panels could produce almost all energy that customer needs, especially if there is battery beside the panels. In case of solar panels load profiles would require some kind of factor which could model production of panels.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitoksella. Työn tarkastajana toimi professori Pertti Järventausta ja ohjaajana tutkija Antti Mutanen, molemmat Tampereen teknilliseltä yliopistolta.

Haluan kiittää työni tarkastajaa sekä ohjaajaa hyvistä ja rakentavista kommentteista sekä mahdollisuudesta muokata työn aihetta oman kiinnostukseni mukaiseksi. Lisäksi haluan kiittää Elenia Oy:tä sekä There Corporationia, joiden yhteinen pilottihanke mahdollisti käytännönläheisen tutkimuksen työn aiheen parissa. Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni tämän työn ja koko opiskeluaikani kestäneestä tuesta sekä ystäviäni, jotka tekivät opiskeluvuosistani ikimuistoisia.

Tampereella 31.5.2013

Kaisa Grip

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	ÄLYKKÄÄT SÄHKÖVERKOT .....	3
2.1	Etäluettavat sähkömittarit .....	4
2.2	Kysynnän jousto.....	5
2.2.1	Kysynnän jouston edut ja haitat .....	8
2.3	Hajautettu tuotanto.....	9
2.3.1	Pientuotanto.....	9
2.3.2	Mikrotuotanto.....	12
3	KUORMITUSMALLIT .....	14
3.1	Kuormitukseen vaikuttavat tekijät .....	14
3.2	Kuormien lämpötilariippuvuus .....	16
3.3	Sähkökäyttäjien luokittelu .....	18
3.4	Kuormitusten mallintaminen .....	19
3.5	Yksilölliset kuormitusmallit.....	22
4	ERILAISET KUORMITUSVAIHTOEHDOT.....	24
4.1	Kuorman mallinnus.....	26
4.2	Kuorman ja kysynnän jouston mallinnus.....	28
4.3	Tuotannon mallintaminen .....	30
4.4	Kuorma ja tuotanto .....	31
4.5	Kuorma, tuotanto ja sähkövarasto.....	34
5	KUORMAN OHJAUKSEN VAIKUTUS TUNTITEHOMITTAUKSIIN .....	36
5.1	Tehokaistapilotin taustaa.....	36
5.2	Tehokaistan toiminta.....	38
5.3	Kuorman ohjauksen näkyminen kuormituskäyrissä .....	40
5.4	Kuorman ohjauksen vaikutus pysyvyyskäyriin .....	45
5.5	Kokemuksia tehokaistapilotista .....	49
6	AURINKOPANEELIEN VAIKUTUS KUORMITUKSEEN .....	50
6.1	Paneelien tuottama energia .....	50
6.2	Tuotannon vaikutus kuormitukseen .....	52
6.3	Aurinkopaneelit ja sähkövarasto .....	56
7	KUORMITUSTEN MALLINTAMISEN KEHITTÄMISMAHDOLLISUUDET.....	59
7.1	Kuorman ohjauksen mallintaminen .....	59
7.2	Aurinkopaneelien mallintaminen.....	60
8	YHTEENVETO .....	65
	LÄHTEET.....	67

LIITE 1: KUORMITUSKÄYRÄT .....	70
LIITE 2: LÄMPÖTILAKORJATUT PYSYVYYSKÄYRÄT .....	71

## LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIEN MÄÄRITELMÄT

$a$	ylitystodennäköisyys
$E[T(t)]$	ulkolämpötilan odotusarvo ajanhetkellä $t$
$E[P(t)]$	kuormituksen odotusarvo ajanhetkellä $t$
$k_1$	Velanderin kerroin 1
$k_2$	Velanderin kerroin 2
$P_i$	kuluttajan $i$ tuntikeskiteho
$P_{it}$	kuluttajan $i$ keskiteho ajanhetkellä $t$
$P_{max}$	huipputeho
$P_{ryhmä,t}$	ryhmän tuntikeskiteho ajanhetkellä $t$
$\Delta P(t)$	ulkolämpötilasta riippuva kuorma ajanhetkellä $t$
$T_{ave}$	edellisen vuorokauden keskimääräinen ulkolämpötila
$W$	vuosienergia
$z_a$	ylitystodennäköisyyttä $a$ vastaava korjauskerroin
$\alpha$	lämpötilariippuvuusparametri
$\sigma$	hajonta
$\sigma_{it}$	kuluttajan $i$ tuntikeskitehon hajonta ajanhetkellä $t$
$\sigma_{ryhmä,t}$	tuntikeskitehon hajonta ajanhetkellä $t$
AMR	Automatic Meter Reading, automaattinen mittariluenta
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
DR	Demand Response, kysynnän jousto
GSM	Global System for Mobile Communications, matkapuhelinjärjestelmä
jne.	ja niin edelleen

# 1 JOHDANTO

Älykäs sähköverkko mahdollistaa laajamittaisemman hajautetun tuotannon ja kysynnän jouston sekä kaksisuuntaisen tiedon siirron asiakkaan, sähkön myyjän ja verkkoyhtiön välillä. Olennainen osa älykkään sähköverkon konseptia on AMR -mittarit, joiden avulla saadaan suoraan asiakkaiden ajankohtaiset kuormitustiedot ja voidaan tehostaa verkon kuormituksen valvontaa. Lisäksi AMR -datan perusteella voidaan luoda kuormitusennusteita.

AMR -mittareista saatavan datan avulla voidaan myös luoda pohja kysynnän jouston tarpeelle. Mittausdatan perusteella voidaan rakentaa kuormitusennusteita, joiden avulla saadaan tieto huippukuormituksen ajankohdasta. Näiden ennusteiden perusteella voidaan leikata kuormaa ennustettujen huippukuormitustilanteiden ajankohdilta. Tässä työssä tarkastellaan tehokaistapohjaista kuorman ohjausta ja sen vaikutuksia yksittäisen asiakkaan kuormituskäyttäytymiseen. Tehokaista määrittelee kulutukselle tehorajan, jonka ylittyessä ohjattavia osakuormia leikataan verkosta tarvittava määrä, jotta tehoraja alittuu. Lisäksi tässä menetelmässä on määriteltynä kuormitukselle hysteresiraja, jonka alituttua ohjattavia osakuormia palautetaan takaisin. Työssä tarkastellaan myös kysynnän hintajouston vaikutuksia yksittäisen asiakkaan kuormituskäyttäytymiseen todellisessa pilotkohteessa.

Kuorman ohjauksen lisäksi tulevaisuudessa myös yksittäisillä sähkön pienkäyttäjillä saattaa olla omaa tuotantoa, esimerkiksi aurinkopaneeleja tai pientuulivoimala, jotka muuttavat asiakkaan kuormituskäyttäytymistä merkittävästi. Oma tuotanto ja mahdollisuus energian varastointiin vähentävät asiakkaan tarvetta ostettuun sähköön. Tuotannon satunnaisuus aiheuttaa kuitenkin haastetta tällaisen asiakkaan kuormituksen ennustamiseen. Tässä työssä tarkastellaan kuorman ohjauksen lisäksi aurinkopaneelien vaikutusta yksittäisen asiakkaan kokonaiskuormitukseen. Lisäksi tarkastellaan paneelien ja sähkövaraston yhteisvaikutusta kyseisen asiakkaan kuormitukseen. Poiketen tehokaistaohjauksesta aurinkopaneelien tarkastelu on puhtaasti teoreettinen ja suuntaa antava.

Oman tuotannon lisäksi tulevaisuudessa sähkön käyttäjillä voi olla tuotannon rinnalla myös sähkövarasto. Myös kysynnän jouston, oman tuotannon ja sähkövaraston yhdistelmä on mahdollinen. Oman haasteensa kuormitusennusteiden luotettavuuteen luovat myös sähköautot, joiden yleistyminen tulee tapahtumaan lähivuosina. Kuormien mallintamisen kannalta uudenlaiset kuormitukset luovat haasteita. Lisäksi tarve mallien



päivittämiselle ja kehittämiselle lisääntyy. Nykyisten kuormitusmallien muodostaminen perustuu mitattuihin kuormitustietoihin. Sähkökuormat, etenkin sähkölämmitykset, ovat kuitenkin voimakkaasti riippuvaisia muun muassa ulkolämpötilasta. Tämän lämpötilariippuvuuden vuoksi kuormitusmalleja ja -ennusteita rakennettaessa tulee huomioida ulkolämpötilan vaikutus asiakkaiden kuormitukseen. Tulevaisuudessa ulkolämpötila ei kuitenkaan tule olemaan ainoa tekijä, joka vaikuttaa merkittävästi kuorman suuruuteen, sillä peruskuorman lisäksi mittausdata saattaa koostua myös omasta tuotannosta tai kysynnän joustosta.

Kuormitusmallit luodaan yleensä suuremmille asiakasryhmille, joiden sähkön kulutus käyttäytyy samankaltaisesti. Tällöin malleista saadaan tarkempia, sillä satunnaisvaihtelu kuormituksessa vähenee. Malleja voidaan kuitenkin luoda myös yksittäisille asiakkaille, mikäli halutaan tarkastella tarkemmin esimerkiksi muutoksia kuormituksessa. Tämän työn kannalta oli oleellista muodostaa yksilöllinen kuormitusmalli tarkasteltavalle asiakkaalle, jotta kuorman ohjauksen vaikutuksia voitiin tarkastella. Myös muutokset asiakkaan pysyvyyssä havainnollistavat uusien toiminnallisuuksien vaikutuksia kokonaiskuormitukseen ja kuormitusmallien uudistamisen tarvetta.

Tämän työn taustana on kirjallisuusselvitys älykkäistä sähköverkoista sekä kuormitusmalleista. Näiden taustatietojen perusteella analysoidaan mahdollisuuksia erilaisille kuormitusvaihtoehdoille sekä niiden vaikutuksia kuormitusmallien luotettavuuteen ja kehittämistarpeeseen. Tarkempaan tarkasteluun kuormitusvaihtoehtoista on otettu kysynnän jouston ja peruskuorman sekä oman tuotannon ja kuorman yhdistelmät. Lisäksi työssä tarkastellaan aurinkopaneelien rinnalle kytketyn sähkövaraston vaikutusta tuotannon ja kuorman muodostamaan kokonaiskuormitukseen. Lopuksi työssä pohditaan teoreettisesti kuormitusten mallintamisen mahdollisuuksia kysynnän jouston ja oman tuotannon tapauksessa.

## 2 ÄLYKKÄÄT SÄHKÖVERKOT

Älykkään sähköverkon (Smart Grid) käsite ei ole yksiselitteinen, vaan sillä on useampia määritelmiä lähteestä riippuen (Cowan & Daim 2012). Verrattuna perinteiseen sähköverkkoon älykkäässä verkossa tieto ja sähkö liikkuvat kahteen suuntaan. Älykkäällä sähköverkolla tarkoitetaan yleensä sähköverkkoa, joka mahdollistaa tiedon ja energian kaksisuuntaisen siirron kuluttajalta verkkoyhtiölle ja sähkön tuottajalle. Älykkäässä sähköverkossa yhdistyvät automaatio- ja tietoliikennetekniikka sekä nykyinen sähkönsiirtojärjestelmä. Tietoliikennetekniikan hyödyntämisellä voidaan tehostaa sähkön käytön seuranta. Olennainen osa älykkäitä sähköverkkoja ovatkin etäluettavat sähkömittarit (AMR -mittarit). (Energiateollisuus ry 2012)

Älykkäät sähköverkot mahdollistavat laajamittaisemman hajautetun sähkön tuotannon. Pientuotannon lisääntyminen muuttaa kuluttajien sähkökuormia sekä verkon käyttötapoja. Nämä muutostiedot välittyvät älykkään sähköverkon kautta verkkoyhtiölle ja niihin voidaan reagoida vaadittavalla tavalla. Lisäksi keskitetyn ja hajautetun tuotannon käytön tehokkuus ja yhteistoiminta paranee kaksisuuntaisen tiedonsiirron seurauksena. Parempaan tiedonkulun ansiosta sähkönjakelun luotettavuus ja käyttövarmuus sekä sähkön laatu paranevat. (Cowan & Daim 2012; Energiateollisuus ry. 2012)

Paikallinen sähkön pientuotanto ei ole ainoa toiminto tulevaisuudessa, joka vaatii sähköverkolta kaksisuuntaisuutta sekä kuormien ohjausta. Verkosta ladattavat sähköautot tulevat lisäämään verkon kuormitusta, jolloin verkkoyhtiöllä tulee olla mahdollisuus hallita latauskuormia. Sähköautojen lisäksi lämmityskuormia voidaan kytkeä verkkoon alikysynnän tai ylituotannon aikana sähkön kulutuksen tasoittamiseksi. (Cowan & Daim 2012; Energiateollisuus ry. 2012)

Älykäs sähköverkko mahdollistaa hajautetun tuotannon lisäksi myös sähkön varastoinnin sekä saarekekäytön. Kuluttaja voi varastoida tuottamaansa sähköä halutessaan ja käyttää sen sopivana ajankohtana, esimerkiksi sähkön hintapiikin tai vikatilanteen aikana. Myös sähköautot voidaan laskea sähkövarastoiksi. (Cowan & Daim 2012) Verkkoyhtiön tiedossa olevaa sähkön pientuotantoa voidaan käyttää verkon vikatilanteissa varavoimana. Tässä tapauksessa saareke eristetään muusta jakeluverkosta vian korjauksen ajaksi. Saarekekäyttö vaatii laajamittaisempaa pientuotantoa, jotta se kattaa koko saarekkeen sähkön kulutuksen.

Älykkään sähköverkon kaksisuuntainen tiedonsiirto mahdollistaa myös kysynnän jouston (Demand Response, DR) tehokkaan käytön. Lisääntynyt kiinnostus kysynnän

jouston hyödyntämiseen on peräisin lisääntyneestä sähkön kulutuksesta sekä huippuotantokapasiteetin rajallisuudesta. Jouduttaessa käyttämään huippukuormavoimaloita suuren kulutuksen vuoksi myös sähkön hinta nousee. Kysynnän jouston potentiaalin hyödyntäminen mahdollistaa kuormien ohjauksen sähkön markkinahinnan sekä sähkönkulutuksen perusteella. Kuormia voidaan kytkeä pois verkosta huippukuormitustilanteissa ja palauttaa takaisin pienemmän kulutuksen aikana, jolloin sähkön kulutus tasoittuu. Sähkön markkinahintaan perustuvan kysynnän jouston tarkoituksena on siirtää kuormitusta halvimman hinnan ajankohtaan, mikäli se on mahdollista. (Rittonummi & Matikainen 2008) Kysynnän joustoja käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.

## 2.1 Etäluettavat sähkömittarit

Jotta älykkään sähköverkon konsepti voidaan toteuttaa, verkkoyhtiön ja asiakkaan välisen tiedonsiirron on toimittava ongelmitta. Tästä tiedonsiirrosta huolehtivat osaltaan automaattinen mittariluenta (AMR, Automatic Meter Reading) ja etäluettavat sähkömittarit, jotka mittaavat sähkön kulutuksen päivän jokaiselta tunnilta erikseen ja lähettävät asiakkaan sähkönkulutustiedot verkkoyhtiölle. Mittaritietojen avulla verkkoyhtiö pystyy laskuttamaan asiakkaitaan todellisen kulutuksen mukaan. Lisäksi asiakas voi halutessaan tarkkailla omaa sähkön kulutustaan internetistä lähes reaaliajassa. (Kauppinen 2011; TEM 2009)

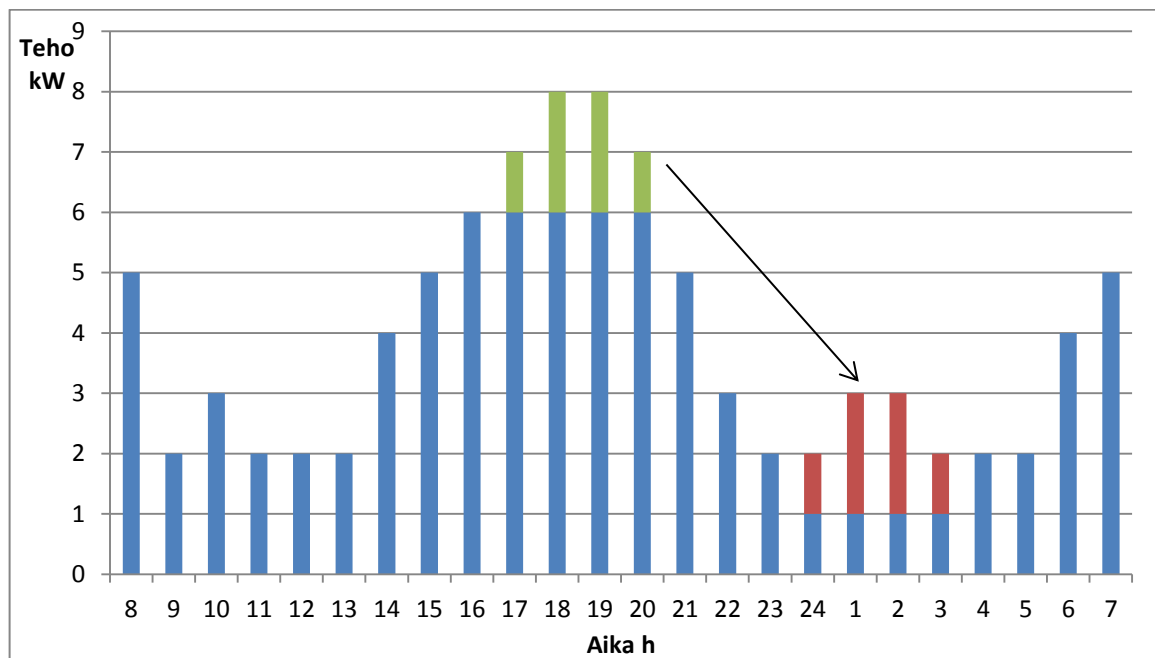
AMR -mittareilla on myös muita toimintoja tuntienergiamittauksen lisäksi. Mittareilla voidaan tarkkailla jännitteen laatua sekä rekisteröidä keskeytykset. Lisäksi niillä voidaan kytkeä ja katkaista sähkön toimitus. AMR -mittarit voidaan myös integroida hälyttämään esimerkiksi sähkön syötön tai nollajohdon katkeamisesta. Jotta AMR-mittareiden hälytystoiminnot eivät hidastaisi tietoverkon toimintaa, hälytysominaisuutta käytetäänkin lähinnä pienjännitevioissa tai mittareille lähetetään kyselyitä niiden tilasta vain tarvittaessa. (Lakervi & Partanen 2008, s. 258–259) Etäluettavien sähkömittareiden keräämän tiedon avulla voidaan myös muodostaa kuormituskäyriä asiakkaiden sähkön kulutuksesta. Näiden käyrien avulla voidaan ennustaa asiakkaan kuormituskäyttäytymistä sekä arvioida kuorman ohjauksen mahdollisuutta. Mittareiden avulla voidaan myös toteuttaa kuormien ohjausta, sillä mittareiden sisälle on integroitu ohjausrele. (Kauppinen 2011)

Etäluettavien mittareiden asentaminen tuo mukanaan myös muita etuja. Reaaliaikaisen mittaustiedon avulla verkkoyhtiö pystyy seuraamaan tarkemmin jakeluverkossa tapahtuvia häviöitä sekä sähkön laatua ja katkokkien määrää. Lisäksi verkostolaskenta tarkentuu uusien kuormitusmallien myötä ja verkkoinvestoinnit voidaan ajoittaa paremmin. Etäluennan avulla verkkoyhtiö voi myös kehittää ja parantaa asiakaspalveluaan. (Rittonummi & Matikainen 2008, s. 72–73)

Suomessa on asennettu etäluettavia mittareita jo laajasti, ja Suomea voidaankin pitää edelläkävijämaana uusien älykkäiden mittareiden käyttöönotossa. Vuonna 2009 asetetun säädöksen tavoitteena on, että vuoden 2013 loppuun mennessä kaikista sähkömittareista 80 % olisi AMR -mittareita. Asetuksella pyritään tehokkaampaa energiajärjestelmään ja sähkömarkkinoihin sekä parempaan asiakaspalveluun. Todennäköisesti kuitenkin mittareiden lukumäärässä saavutetaan jopa 90–95 %:n osuus vuoteen 2014 mennessä. Ainoastaan hankalat kohteet, kuten esimerkiksi saarissa sijaitsevat kesämökkit sekä GSM -verkon saavuttamattomissa olevat asunnot, jäävät etäluennan ulkopuolelle. (Ritonummi & Matikainen 2008, s. 39–40; TEM 2009)

## 2.2 Kysynnän jousto

Eräs älykkään sähköverkon mahdollistamista toiminnallisuuksista on kysynnän jousto. Kysynnän joustolla tarkoitetaan mahdollisuutta leikata asiakkaan kuormitusta huippukuormituksen aikaan tai sähkön hinnan ollessa korkeimmillaan. Huippukuormituksen aikaan tapahtuvasta tehon leikkauksesta käytetään nimitystä suora kuorman ohjaus, ja sähkön hintaa seuraavasta leikkauksesta puhutaan kysynnän hintajoustona. (Belonogova et al. 2010) Kuvassa 2.1 on havainnollistettu kuorman leikkaamista ja siirtämistä huippukuormitustilanteesta pienemmän kuormituksen ajankohtaan. Kuvassa 2.1 pylvään korkeus kertoo kulutetun tehon kyseisellä ajanhetkellä. Vihreällä on kuvattu ne tehot, jotka leikataan ja punaisella siirretyt tehot. Kuvan 2.1 nuoli havainnollistaa kuorman siirtämistä. Hintaohjatussa tilanteessa toimitaan vastaavasti.



*Kuva 2.1 Sähkön kysynnän jousto ajan ja tehon funktiona*

Kysynnän jouston toteuttaminen vaatii taustalleen älykkään sähköverkon. AMR-mittareiden mittaaman kulutuksen perusteella verkkoyhtiö saa tietoa potentiaalisista ohjattavista kuormista. Lisäksi tietoliikenteen kuluttajan ja verkkoyhtiön välillä on toimittava moitteettomasti, jotta verkkoyhtiön tekemät ohjaustoimenpiteet välittyisivät kulutuskohteeseen.

Luonteeltaan suora kuorman ohjaus ja hinnan mukaan tapahtuva ohjaus ovat erilaisia. Kuormaa leikattaessa huippukuormitustilanteessa tavoitteena on turvata sähkön jakelu pienentämällä verkon kuormitusta. Lisäksi verkon vahvistustarve vähenee tai siirtyy myöhempään ajankohtaan pienemmän kuorman seurauksena. Kuorman ohjauksella verkkoyhtiö pyrkii minimoimaan omat investointikustannuksensa, joita aiheutuisi verkon vahvistamistarpeesta. Hintaohjatussa kysynnän joustossa pyritään parantamaan asiakastyytyväisyyttä kuorman siirtämisellä halvemman sähkön ajankohtaan. Kummassakaan tapauksessa kysynnän joustolla ei siis ensisijaisesti pyritä saavuttamaan energian säästöä. (Belonogova et al. 2010; Albadi & El-Saadany 2008)

Suora kuorman ohjaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla riippuen leikattavan tehon suuruudesta. Suurissa kulutuskohteissa, kuten teollisuudessa, voidaan leikata hetkellisesti kokonainen tuotantoprosessi, jolloin verkon huipputeho alenee merkittävästi. Teollisuuskuormia käytetään myös kuorman ohjauksen sijaan taajuusohjattuna häiriöreservinä, joka verkon vikatilanteessa kytkeytyy pois verkon taajuusvaihteluiden mukaan. Häiriöreservit toimivat ainoastaan verkon vikatilanteissa eikä niitä voida ohjata verkon kuormituksen mukaan. Toisessa tapauksessa pienennetään tehonkulutusta leikkaamalla vain osa kuormasta. Tämä ohjaustapa mahdollistaa kysynnän jouston hyödyntämisen myös pienissä kulutuskohteissa, kuten kotitalouksissa. (Capehart 2007)

Toteutettaessa kysynnän joustoa voidaan hyödyntää yhtäaikaaisesti sekä huippukuorman leikkaamista että hintajoustoa. Tässä tapauksessa kysynnän hintajoustolla alennetaan kulutuspiikkejä aamulla ja illalla, jolloin sähkön hinta on korkeimmillaan. Tämä kuorma siirretään niihin hetkiin, jolloin sähkön kulutus ja hinta ovat matalammillaan. Huippukuorman leikkaus tapahtuu pääsääntöisesti illalla, kun lämmityskuormat kytketään verkkoon, mutta kuormaa voidaan leikata myös aamulla. Hintajoustolla siis tasoitetaan pidemmän ajanjakson ja kuorman leikkaamisella lyhyemmän jakson kuormitusta. (Belonogova et al. 2010)

Kysynnän joustoa voidaan soveltaa sekä suurempiin energian kuluttajiin, kuten palvelualoille ja teollisuuteen, että pienkuluttajiin. Palvelualoilla kolme potentiaalisinta kuormanleikkauskohdetta ovat valaistus, ilmastointi sekä lämmitys. Sammuttamalla ylimääräiset valot voidaan suuressa rakennuksessa säästää merkittävä määrä energiaa. Lisäksi alentamalla sisälämpötilaa asteella ja säätämällä ilmastoinnin tehoa voidaan leikata kulutusta. Myös teollisuudessa on useampia vaihtoehtoja kuorman ohjaukselle. Mikäli teollisuuslaitoksessa on mahdollisuus tuotteiden varastoinnille, voidaan tuotantoa keskittää pienemmän kuormituksen ajankohtiin. Jatkuvan tuotannon laitoksissa puolestaan tuotannon

tehoa voidaan laskea huippukuormitustilanteissa. Myös jäähdytysjärjestelmissä ja ilman paineistamisessa voidaan soveltaa tehon alentamista. (Capehart 2007)

Asuinrakennuksissa kysynnän jousto voidaan toteuttaa säätämällä lämmitystä ja ilmastointia. Suomessa kysynnän jouston suurin potentiaali on varaavien sähkölämmitteisten pienkäyttäjien tapauksessa. Näissä talouksissa lämmityksen lisäksi käyttöveden lämmitys kuluttaa sähköä. Varaavia lämmityskuormia voidaan ohjata huomaamattomasti, sillä lämmitys tapahtuu yleensä yöaikaan klo 22:n jälkeen, jolloin kuorman kytkeminen verkkoon voidaan sijoittaa aikavälille 22–07. Tällä toimenpiteellä vältytään suurelta hetkelliseltä tehon kasvulta ja kulutuspiikeiltä. Myös sähkösauna ja auton lämmitys talvisin ovat potentiaalisia kohteita kysynnän jouston toteuttamiselle, mutta näiden ohjaaminen on hankalaa asiakkaan asumismukavuuden kannalta. (Rittonummi & Matikainen 2008, s.54–55; Belonogova et al. 2010)

Kysynnän jousto ja kuormien ohjaus voidaan toteuttaa pienkäyttäjän tapauksessa usealla eri tavalla. Yleisin vaihtoehto on automaattinen ohjaus, jossa verkkoyhtiö tai sähkön myyjä huolehtii asiakkaan kuorman ohjauksesta sovittujen ehtojen mukaisesti. Tässä tapauksessa asiakas hyötyy kuorman ohjauksesta rahallisesti. Asiakas voi myös kieltäytyä ohjauksesta, mutta seurauksena asiakas joutuu maksamaan suuremman hinnan kuluttamastaan sähköstä. Hintaohjatussa tilanteessa ohjauksesta kieltäytymisestä ei automaattisesti seuraa toimenpiteitä. Automaattinen kuorman ohjaus vaatii sujuvaa tiedonsiirtoa verkkoyhtiön ja asiakkaan välillä sekä ohjausreleen moitteetonta toimintaa. (Rittonummi & Matikainen 2008; Belonogova et al. 2010)

Automaattisen ohjauksen lisäksi sähkön myyjä ja jakeluverkkoyhtiö voivat taloautomaation kautta ohjata kuluttajan sähkökuormia. Taloautomaatiossa eri kuormat (lämmitys, lämminvesivaraaja, sähkökuivaus, jne.) on kytketty oman ohjausreleen taakse ja tarvittaessa ne voidaan kytkeä pois erikseen. Tämän ohjauksen haasteena on ratkaisun monimutkaisuus. Kuluttaja voi myös itse huolehtia kuormiensa ohjauksesta sähkön hintajouston tapauksessa. Tämä vaihtoehto vaatii kuitenkin kuluttajan tietoisuutta omasta kuormituksestaan sekä sähkön hintatiedot hetkeltä, jolloin kuormaa aiotaan leikata. Omaan aktiivisuuteen perustuvan kuorman ohjauksen keskeisenä ongelmana on kuluttajan halukkuus leikata kulutustaan sähkön hinnan ollessa korkealla. (Rittonummi & Matikainen 2008, s. 58–60)

Teollisuudessa kysynnän jousto on suoraan riippuvainen prosessien sähkön kulutuksesta. Teollisuusprosessien alasajoa ei voida suorittaa suoraan kuormitustilanteesta riippuen, sillä tuotteiden saatavuus on turvattava ja välivarastoja on vähän. Lisäksi suuret teollisuusprosessit vaativat tietyn vasteajan, jonka jälkeen kysynnän jousto voidaan toteuttaa uudelleen. Teollisuudessa sähköenergian hinta on myös suurelta osin hintasuojattua. (Rittonummi & Matikainen 2008, s. 62–66)

## 2.2.1 Kysynnän jouston edut ja haitat

Huippukuormituksen leikkaamiseen sekä verkon kuormituksen että sähkön hinnan perusteella liittyy etuja ja haittoja. Nämä edut ja haitat voidaan jakaa kolmeen ryhmään: asiakkaan, sähkön myyjän ja sähköverkon kokemiin. Asiakkaan ja sähkön myyjän kannalta kysynnän joustolla vaikutetaan sähkön hintaan. Asiakas hyötyy rahallisesti kuorman siirtämisestä halvemmän sähkön ajankohtaan. Lisäksi sähkön myyjä tai verkkoyhtiö voi maksaa asiakkaalle palkkiota kysynnän jouston käyttöönotosta. Myyjän näkökulmasta kysynnän joustolla voidaan alentaa sähkön myyntihintaa ja hankintakustannuksia. (LUT 2012; Valtari 2012)

Siirtoverkon kannalta huipun leikkaamisella voidaan ehkäistä tehopulan mahdollisuutta. Kulutusta leikattaessa huippukuormitustilanteessa vältetään tilanteelta, jossa sähkön tuotantokapasiteetti tai jakeluverkon siirtokyky eivät kata kulutusta. Kysynnän jousto ja älykkäät sähköverkot mahdollistavat myös hajautetun tuotannon liittämissä osaksi sähkön tuotantojärjestelmää. Kuormien ohjaamisen ja leikkaamisen seurauksena riskien hallinta helpottuu ja ylikuormasta aiheutuvat jakeluhäiriöt vähenevät. Lisäksi verkkoyhtiö säästää pitkällä tähtäimellä verkon investointi- ja huoltokustannuksissa, sillä huoltokatkot vähenevät ja verkon rasitus pienenee. (Valtari 2012)

Kuorman leikkaamisella on myös vaikutuksia ympäristöön. Vähennettäessä huippukuormia myös tarve käyttää huippukuormalaitoksia, kuten kaasuturbiinivoimaloita, vähenee ja täten päästöt ympäristöön pienevät. Lisäksi kysynnän jousto parantaa asiakkaiden energiatehokkuutta jakamalla kulutusta tasaisemmin vuorokauden sisällä. (Valtari 2012)

Kysynnän joustoon liittyy myös haittoja ja tarpeita. Jotta kysynnän jouston toteuttaminen on mahdollista, sekä asiakkaalta että ohjauksen toteuttajalta vaaditaan investointeja. Asiakkaan on asennettava talouteensa vaadittava teknologia sekä laadittava sähköyhtiön tai sähkön myyjän kanssa suunnitelma kuorman ohjauksesta. Ohjaustoimenpiteistä vastaavan on vastaavasti huolehdittava tiedonsiirron ja mittauksen toimivuudesta sekä asiakkaan opastamisesta siinä tilanteessa, että asiakas huolehtii itse kuormansa ohjaamisesta. Sähkön myyjän toimesta tapahtuvan kuorman ohjauksen aikana asiakkaan kokemat haitat vaihtelevat ohjauksesta riippuen. Suunnitelman sisällöstä riippuen haitat voivat kohdistua asiakkaan henkilökohtaiseen mukavuuteen tai teollisuusasiakkaan tapauksessa tuotannon aikataulutukseen. Kuorman ohjaajan näkökulmasta haitat liittyvät ohjauksen kustannuksiin ja hallitsemiseen. Jakeluverkkoyhtiön kannalta kysynnän jouston toteuttaminen vaatii uusia tariffirakenteita. Lisäksi yhtiön on markkinoitava kysynnän jouston mahdollisuutta ja sen tuomia etuja uusille asiakkaille. Ohjaavan osapuolen on myös arvioitava kysynnän jouston toimivuutta ohjaustoimenpiteiden kehittämiseksi. (LUT 2012; Valtari 2012)

## 2.3 Hajautettu tuotanto

Kysynnän jouston lisäksi älykkään sähköverkon konsepti mahdollistaa mittavamman hajautetun tuotannon käytön. Hajautetulle tuotannolle ei ole yhtä vakiintunutta määritelmää, mutta yleensä sillä tarkoitetaan kulutuskohteiden läheisyydessä olevaa pienimuotoista sähköntuotantoyksikköä, joka toimii useimmiten uusiutuvalla energialla. Myös uusiutumattomalla energialla toimivia voimalaitoksia, esimerkiksi maakaasulla toimivia kaasuturbiinilaitoksia, voidaan käyttää sähkön hajautettuun tuotantoon. Hajautetulla tuotantolaitoksella voidaan tarkoittaa laitosta, joka on liitetty jakeluverkkoon tai kuluttajan verkkoon. Yleisimpiä hajautetun tuotannon yksiköitä ovat tuuli- ja aurinkovoimalat, pienvesivoima sekä bioenergiaa hyödyntävät laitokset. (Energiateollisuus ry 2011; Motiva 2012)

Hajautettu tuotanto voidaan jakaa tuotetun sähkön määrän perusteella kahteen alaluokkaan. Pientuotannolla tarkoitetaan tuotantoa, jossa laitoksen koko vaihtelee muutaman kymmenen kilowatin (kW) tehosta korkeintaan muutamaan megawattiin (MW). Pientuotantoa käsitellään luvussa 2.3.1. Pientuotannon käsite sekoitetaan usein mikrotuotannon kanssa. Mikrotuotannolla tarkoitetaan pienjänniteverkkoon kulutuskohteen yhteyteen asennettua voimalaitosyksikköä, joka tuottaa ensisijaisesti sähköä vain kohteen käyttöön. Tällainen yksikkö ei pääsääntöisesti syötä verkkoon, mutta satunnainen syöttö on mahdollista. Mikrotuotannoksi luetaan voimalaitokset, joiden maksimiteho on 11 kW eli se on liitetty verkkoon enintään  $3 \times 16$  A:n sulakkeilla. Mikrotuotantoa käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.2. (Energiateollisuus ry 2011; Motiva 2012)

### 2.3.1 Pientuotanto

Usein pientuotannosta käytetään nimitystä hajautettu tuotanto, sillä tuotantolaitokset sijaitsevat lähellä kulutuspistettä. Lisäksi voimalaitokset tuottavat sähköä suuremmalle asiakasryhmälle kuin mikrotuotannon tapauksessa. Hajautetun tuotannon muodoista tuuli-, aurinko- sekä pienvesivoimalla on monia yhteisiä piirteitä. Ne eivät vaadi polttoainetta tuottaakseen sähköä, voimalaitokset eivät edellytä pysyvää miehitystä ja kustannukset painottuvat investointikustannuksiin käyttökustannusten ollessa vähäiset. (Motiva 2012)

Lisäksi näillä tuotantomenetelmillä käytön aikaiset päästöt ovat vähäisiä. Hajautetulla tuotannolla pyritäänkin mahdollisimman alhaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Näistä kolmesta tuotantomuodosta pienvesivoimalla voidaan tuottaa sähköä tasaisimmin, sillä tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä riippuu voimakkaasti tuulen nopeudesta ja hetkittäiset tehot vaihtelevat suuresti. Aurinkosähköstä puhuttaessa on otettava huomioon auringon säteilyn määrä pinta-alaa kohden eli säteilyn intensiteetti, joka vaihtelee suuresti maantieteellisestä sijainnista riippuen. Lisäksi aurinkopaneelien tapauksessa on huomioitava muun muassa paneelin kallistuskulma sekä ilman lämpötila.



Käytettäessä bioenergiaa hajautetussa tuotannossa voimalaitos tuottaa usein sekä sähköä että lämpöä. Tällaisesta laitoksesta käytetään nimitystä CHP -laitos (Combined Heat and Power). Näissä laitoksissa pienten moottoreiden tai turbiinien avulla pyritetään generaattoria, joka tuottaa sähköä. Laitoksissa syntyvä lämpö johdetaan kaukolämmitykseen. Polttoaineena bioenergiolaitoksissa käytetään biokaasua, joka sisältää metaania, hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita yhdisteitä. Biokaasun lähteitä ovat muun muassa erilaiset biojätteet, eläinten lanta sekä erilaiset orgaaniset jätteet. Myös kaatopaikoilla syntyy merkittäviä määriä metaania. Lisäksi biovoimalaitoksissa poltetaan erilaisia biomassoja, kuten esimerkiksi haketta. (Motiva 2012)

CHP -laitoksessa voidaan polttaa myös uusiutumattomia polttoaineita, kuten maakaasua ja dieseliä, joiden energiatiheys on huomattavasti suurempi kuin uusiutuvilla energialähteillä. Näissä laitoksissa sähköä voidaan tuottaa esimerkiksi generaattoriin yhdistetyillä kaasu- ja dieselmootoreilla, mikro- ja höyryturbiineilla ja Stirling-mootoreilla. Pienimmät tehot saadaan Stirling -mootoreilla, ja suurimpiin tehoihin päästää kaasu- ja dieselturbiineilla sekä haketta polttavilla kattilalaitoksilla. (Motiva 2012; Short 2003)

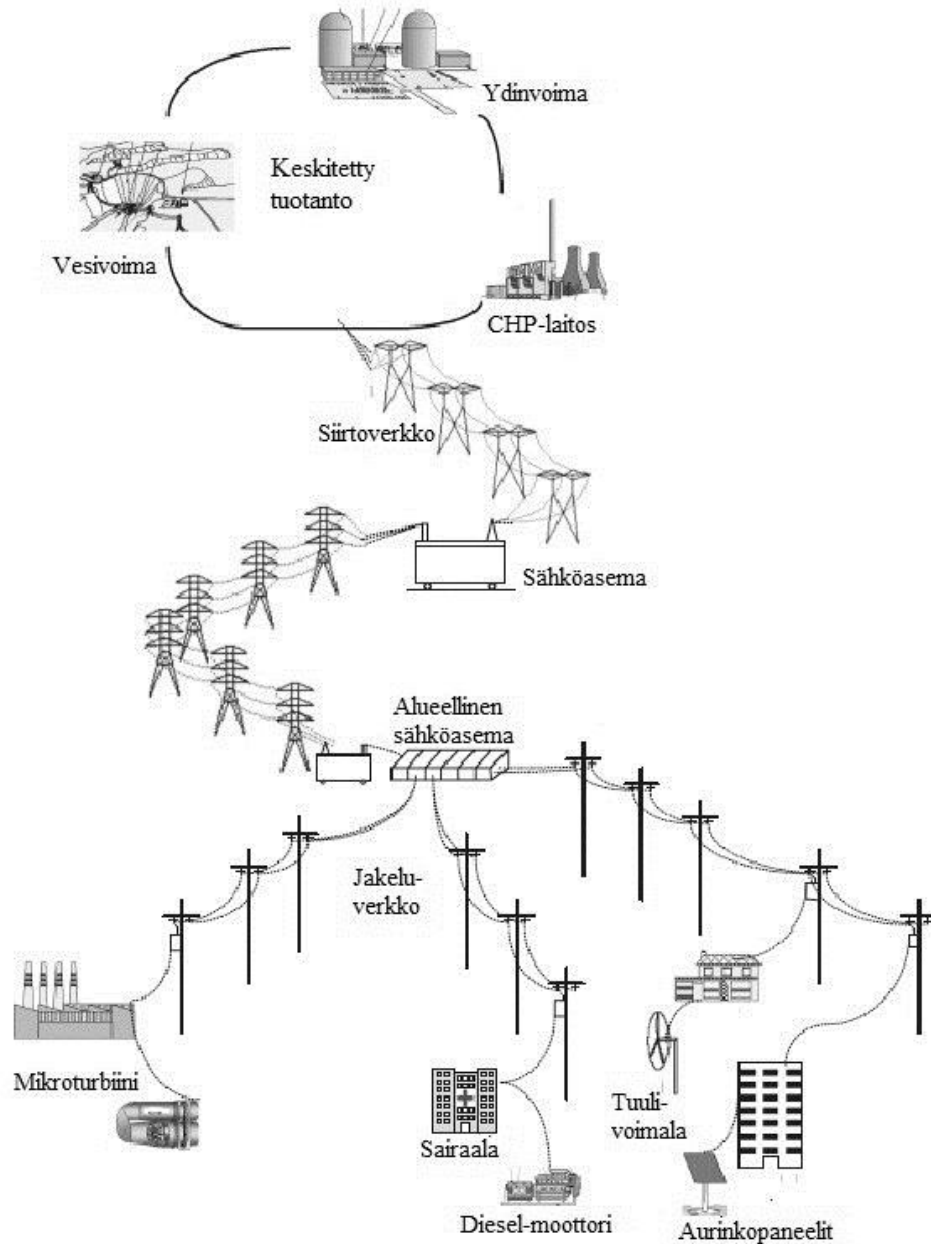
Hajautetun tuotannon yleistyminen ja kehittyminen vaatii taustalle älykkään sähköverkon, jotta sähkön jakelu olisi joustavaa ja turvallista. Toimiessa halutulla tavalla pientuotanto vähentää jakeluverkon kuormitusta ja lisää sähkön tuotantokapasiteettia. Lisäksi tilanteessa, jossa paikallinen kulutus on tuotantoa vähäisempää pienvoimala voi syöttää tehoa jakeluverkkoon vaikuttaen jännitteen laatuun ja verkon käyttövarmuuteen.

Pientuotantoon liittyy myös riskejä. Verkon vikatilanteissa hajautettu tuotanto voi aiheuttaa ongelmia. Vikatilanteessa pienvoimala voi syöttää tehoa vikapaikkaan, jolloin vian havaitseminen vaikeutuu. Toisessa tapauksessa voimala voi jäädä vikapaikan taakse, jolloin muodostuu saareke. Saarekkeella tarkoitetaan tilannetta, jossa yksittäinen generaattori syöttää pientä muusta verkosta erillään olevaa verkon osaa. Saarekkeen muodostuminen vaarantaa sähkötyöturvallisuuden, joten ennen vian korjaamista on varmistettava verkon jännitteettömyys. Lisäksi saarekemahdollisuudesta johtuen verkkoyhtiöllä pitää olla tieto jokaisesta verkkoon yhteydessä olevasta pienvoimalasta. Saarekkeen muodostuminen voi aiheuttaa saarekkeeseen jännite- ja taajuusongelmia. (Short 2003)

Saarekekäyttö voi olla myös uusi mahdollisuus parantaa käyttövarmuutta paikallisesti. Verkon vikaantuessa hajautettu tuotanto voi muodostaa erillisen saarekkeen, joka toimii itsenäisenä ja eristettynä yksikkönä muun verkon ulkopuolella vikatilanteesta huolimatta. Hallitulla saarekekäytöllä pientuotanto vähentää paikallisesti sähkökatkojen määrää ja turvaa paikallisen sähkön jakelun. Hallitun saarekekäytön haasteena on kuitenkin verkon stabiiliuden säilyttäminen. Verkon jännite ja taajuus eivät saa vaihdella liikaa saarekekäytössä sähkön laadun takaamiseksi. (Jenkins et al. 2010, s.175–181)

Suurimpia syitä hajautetun tuotannon yleistymiselle ovat sähkön jakelun

turvaaminen sekä ilmastolliset näkökulmat. Käytettäessä pieniä uusiutuvalla energialla toimivia tuotantolaitoksia sähkön tuotannon kasvihuonekaasupäästöt alenevat. Sähkön jakelun näkökulmasta sähkön laatu paranee ja verkon häviöt vähenevät tuotannon ollessa lähellä kulutusta. Lisäksi pientuotannolla voidaan turvata sähkön jakelu myös alueilla, jotka muussa tapauksessa olisivat eristyksissä tai jakeluverkon ulkopuolella. Esimerkkinä tällaisesta alueesta voidaan pitää saarta, joka sijaitsee etäällä rannikosta ja jossa on useampia mökkejä. Kuvalla 2.2 havainnollistetaan tulevaisuuden sähköverkkoa, jossa yhdistyvät sekä keskitetty tuotanto että pien- ja mikrotuotanto. (Sallam & Malik 2010)



**Kuva 2.2** Tulevaisuuden sähköverkko, muokattu lähteestä (Sallam & Malik 2010)

### 2.3.2 Mikrotuotanto

Yleisimpiä kulutuskohteen yhteyteen asennettuja mikrokokoluokan voimaloita ovat pientuulivoimalat, aurinkopaneelit sekä lämpöpumput. Lisäksi kulutuskohteeseen voidaan asentaa hybridivoimala, joka tuottaa sähköä esimerkiksi pientuulivoimalalla ja muutamalla aurinkopaneelilla. Kotitalouden yhteyteen voidaan asentaa myös pieni sähköä ja lämpöä tuottava CHP -yksikkö, joka korvaa maakaasulla toimivan höyrykattilan. (Energiateollisuus ry 2011; Jenkins et al. 2010, s.1–20)

Mikrotuotantoon liittyy samoja mahdollisuuksia ja riskejä kuin pientuotantoonkin. Verkkoyhtiölle tulee ilmoittaa kulutuskohteessa sijaitsevista tuotantoyksiköistä, jotta vikatilanteissa korjaustoimenpiteet voidaan suorittaa turvallisesti. Kulutuskohteen näkökulmasta oma tuotantoyksikkö pienentää verkosta otettavan tehon määrää ja täten vaikuttaa ostetun sähkön määrään. Lisäksi verkon häviöt ovat pienemmät tilanteessa, jossa sähkön tuotanto tapahtuu lähellä kulutusta. Sähkökatkosten aikana mikrotuotanto mahdollistaa pienimuotoisen sähkön kulutuksen. Tällaisessa tilanteessa on kuitenkin varmistettava sähkön laatu, jotta sähkön käyttö on turvallista ja sähkölaitteet eivät rikkoudu. Kulutuskohteessa voi mikrotuotantolaitoksen lisäksi olla myös sähkövarasto, jonne tuotettua energiaa voidaan varastoida. Varasto voidaan purkaa esimerkiksi keskeytysten tai verkon huippukuormitustilanteen aikana.

Tässä työssä tarkastellaan kotitalouden yhteyteen kytkettyä aurinkovoimalaa, joka tuottaa sähköä muutamalla aurinkopaneelilla. Kulutuskohteen yhteyteen liitetyt aurinkopaneelit valmistetaan nykypäivänä monikiteisestä piistä, sillä niiden takaisinmaksuaika on tarpeeksi lyhyt. Markkinoilla myydään myös yksikiteisestä piistä valmistettuja paneeleja sekä ohutkalvotekniikalla tehtyjä paneeleja, mutta kuluttajan kannalta niiden hinta on liian korkea suhteessa käyttötarkoitukseen. Kalliimmat paneelit soveltuvat paremmin laajamittaisempaan sähkön tuotantoon. Lisäksi laboratorio-olosuhteissa on testattu väriaineaurinkokennoja, mutta alhaisen hyötysuhteen takia ne eivät ole vielä kaupallistuneet. (Grip 2012)

Markkinoilla myytävät aurinkopaneelit koostuvat useista aurinkokennoista, jotka on kytketty sarjaan. Sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen tuottama teho on suoraan verrannollinen niiden lukumäärään, eli suuremmalla kennomäärällä paneelista saadaan enemmän tehoa. Yksittäisen aurinkokennon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. (Goetzberger & Hoffmann 2005)

Tässä työssä tarkasteltava aurinkopaneeliyksikkö on yhdistetty verkkoon, jotta sähkön myynti verkkoyhtiölle olisi mahdollista. Paneelit voidaan kytkeä myös muusta verkosta erilleen. Erillisiä aurinkosähköjärjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi saarella sijaitsevassa mökissä, jonne ei ole jakeluverkkoyhteyttä tai sen rakentaminen olisi kallista. Näiden järjestelmien teho on maksimissaan muutaman kilowatin (kW) luokkaa ja niiden yhteyteen on yleensä kytketty akku. Sähköinen varasto mahdollistaa sähkön saannin myös

öisin ja pilvisellä säällä. (Goetzberger & Hoffmann 2005, s.95–111) Sähköisenä varastona käytetään yleensä akkuja niiden helpon ja nopean lataus-purkaus -syklin takia. Akut ovat kuitenkin vain lyhytaikainen varastoratkaisu. Varastona voitaisiin käyttää myös esimerkiksi polttokennoja. (Luque & Hegedus 2003, s.799–800)

Verkkoon yhdistetty aurinkosähköjärjestelmä on teholuokaltaan eristettyä järjestelmää hieman suurempi, sillä sen oletetaan kattavan suuremman tehontarpeen. Nämä järjestelmät tuottavat tehoa noin 5–10 kW. Verkkoon liitetyt aurinkopaneelit vaativat aina invertteriliitännän, sillä paneeleista saatava jännite pitää muuttaa tasajännitteestä (DC) vaihtojännitteeksi (AC). (Luque & Hegedus 2003)

Verkkoliitännän lisäksi aurinkopaneeleja asennettaessa on otettava huomioon paneelien sijainti rakennukseen nähden sekä asennustapa. Yleensä aurinkopaneelit asennetaan rakennuksen katolle, jotta ne absorboisivat mahdollisimman paljon säteilyä. Paneelit voidaan asentaa myös maahan. Pohjoisissa olosuhteissa lumi asettaa haasteita molemmille asennusvaihtoehdoille. Asennettaessa paneelijärjestelmää katolle on huomioitava katon muoto (harja- vai tasakatto) ja sijainti ilmansuuntiin nähden, paneelien kallistuskulma sekä mahdolliset paneeleita varjostavat tekijät. Harjakaton tapauksessa paneelit voidaan asentaa suoraan katolle, noin 5 cm:n etäisyydelle kattotiilistä. Tällä toimenpiteellä varmistetaan paneelien jäähdytys. Järjestelmän vaatima invertteri sijoitetaan yleensä rakennuksen sisälle. Tasakaton tapauksessa paneelit asennetaan telineille, joilla voidaan säätää kallistuskulmaa ja minimoida varjostuksen vaikutus. Suomen leveysasteilla optimaalinen kallistuskulma on 40–45°:een välillä. Tasakaton tapauksessa invertteri voidaan asentaa sääsuojattuna myös paneelitelineiden alle, sillä se ei koe sään aiheuttamaa rasitusta paneelien alla. (Goetzberger & Hoffmann 2005, s.112–135)

### 3 KUORMITUSMALLIT

Kuormitustietoja tarvitaan suunniteltaessa ja mitoitettaessa sähkön tuotantoa, siirtoa ja jakelua. AMR -mittareilla on nykypäivänä merkittävä rooli kuormitusmallien muodostamisessa. AMR -mittareista saatavan tuntikohtaisen tiedon avulla voidaan luoda kuormitusmalleja erilaisille sähkökuormille sekä päivittää vanhoja kuormamalleja. Uusien mallien avulla voidaan arvioida erityyppisten kuormien vaikutusta jakeluverkkoon sekä luoda ennusteita tulevista kuormitustilanteista.

Kuormitusmalleja ja -tietoja voidaan soveltaa monella eri osa-alueella. Malleja voidaan hyödyntää tariffi- ja verkostosuunnittelussa sekä suunniteltaessa sähkön tuotantoa. Lisäksi kuormitusmallit helpottavat sähkön käytön suunnittelua, toteuttamista sekä tehostamista. Kuormitustietoja käytetään myös asiakaspalvelussa ja laskutuksessa sekä kuormien ohjauksessa. Asiakkaan laskutus perustuu suoraan AMR -mittareilta saatuun tietoon. Lisäksi tarkkoja ennusteita verkon kuormituksesta tarvitaan takaamaan älykkään sähköverkon ja energiamarkkinoiden toimintaa. Kuormitusmallit ovat myös ehto toimivalle kysynnän joustolle. (SENER 1992; Koponen 2012)

Kuormitusmalleissa tarkastellaan eri asiakasryhmiä sekä erilaisia sähkökuormia. Lisäksi voidaan tarkastella yksittäisiä asiakkaita. Kuormamalleja rakennettaessa tulee huomioida myös asiakkaan viikkorytmi, muuttumattomat kuormat sekä mahdollisten lämpöpumppujen vaikutus. (Koponen 2012) Sähkön käyttäjän viikkorytmiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa työn ajoittuminen (päivä-, ilta- tai vuorotyö) sekä työn säännöllisyys (vain arkisin tai sekä arkisin että viikonloppuisin). Lisäksi sähkönkulutuksen suuruuteen vaikuttaa kohteen asukasmäärä. Muuttumattomina kuormina voidaan pitää sellaisia sähkölaitteita, jotka toimivat kokoaikaisesti, kuten esimerkiksi jääkaappi ja pakastin.

#### 3.1 Kuormitukseen vaikuttavat tekijät

Jotta voidaan rakentaa luotettavia ja toimivia kuormitusmalleja, pitää huomioida kuorman tyyppin lisäksi muita tekijöitä, joilla on suora vaikutus kuormitukseen. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi ilmastolliset sekä aikariippuvat tekijät. Kaikkea tietoa ei yleensä ole kuitenkaan saatavilla suoraan, vaan tarjolla olevaa tietoa pitää soveltaa.

Erilaiset kuormat jaetaan yleisesti viiteen luokkaan: asuminen, maatalous, teollisuus sekä yksityiset ja julkiset palvelut. Lisäksi nämä luokat voidaan jakaa alaluokkiin

esimerkiksi lämmitystavan perusteella. Asuminen voidaan jakaa kahteen yläluokkaan, omakotitaloihin sekä rivi- ja kerrostaloihin. Omakotitalot voidaan jakaa useaan tyyppiin lämmitysmuodon perusteella. Omakotitaloissa käytetään lämmitysmuotona usein sähkölämmitystä. Sähkölämmitys voi olla suora, osittain varaava tai täysin varaava. Sähkölämmitys voi olla myös yhdistettynä esimerkiksi kaukolämpöön tai lämpöpumppuun. Sähkölämmityksen lisäksi omakotitalossa voi olla sähkökiuas. Myös muilla lämmitysmuodoilla, kuten esimerkiksi öljyllä, lämmitettävissä omakotitaloissa voi olla sähkökiuas, joka muuttaa kohteen kuormitusta merkittävästi. Rivi- ja kerrostaloissa kuormamallit voidaan rakentaa joko asunto- tai kiinteistökohtaisesti. Myös näissä kohteissa tulee huomioida mahdollisen sähkökiukaan vaikutus. (Seppälä 1996)

Maatalous voidaan jakaa kolmeen osaan: kasvituotanto, karja- ja maitotalous sekä lihan tuotanto. Kasvituotannoksi luetaan sekä maanviljely että kasvihuoneet. Erityyppisen tuotannon lisäksi näissä kulutuskohteissa tulee huomioida mahdollinen asuminen kohteen yhteydessä sekä sähkökiukaan mahdollisuus. Teollisuus puolestaan luokitellaan yksi-, kaksi- tai kolmivuoroteollisuudeksi sen mukaan, työskennelläänkö kohteessa vuorokauden ympäri vai ainoastaan päivisin. Lisäksi teollisuuden osalta huomioidaan laitoksen koko ja tehon tarve (pien-/suurteollisuus). Palvelualoista julkisella tarkoitetaan hallintorakennuksia, koulu- ja opetustoimea sekä sairaaloita ja terveysasemia. Yksityisiä palveluita ovat muun muassa tavaratalot, huoltoasemat, ravintolat ja hotellit. Kullekin palvelutyypille muodostetaan omat mallit kuvaamaan niiden kuormitusta. (SENER 1992)

Muodostettaessa kuormamalleja pitää huomioida myös muita tekijöitä asiakasryhmien lisäksi. Tarkasteluissa pitää ottaa huomioon aikaisemmat kuormitukset sekä sähkökuormien keskinäiset vaikutukset. Tarkasteltaessa aikatekijöitä pitää kuormitusta arvioida kellonajan, viikonpäivän sekä vuodenajan perusteella. Päiväaikaan sähkön kulutus on suurempaa kuin yöllä, ellei käytössä ole yösähköllä lämpiäviä lämpövarastoja. Tämä toimenpide on kannattava käytettäessä sähkön hinnan kaksiaikatariffia, jossa yösähkö on päivä sähköä halvempaa. Lisäksi kulutus vaihtelee viikonpäivän mukaan ja mahdolliset erikoispäivät, kuten esimerkiksi joulun aika ja pääsiäinen, pitää ottaa erikseen huomioon malleja muodostettaessa. Suomessa kuormitukset riippuvat myös voimakkaasti vuodenajasta, sillä lämmityskuormat keskittyvät talveen. (Seppälä 1996) Lisäksi sähkökuorma riippuu valon määrästä ja päivän pituudesta, sillä Suomessa päivän pituus riippuu voimakkaasti vuodenajasta (Koponen 2012). Pohjoisimmassa Suomessa ero on merkittävin, sillä kesäisin valaistusta ei tarvita lainkaan ja talvisin valaistusta tarvitaan lähes koko ajan.

Kuormituskäyttäytyminen riippuu myös huomattavasti muista ilmastollisista tekijöistä, joista merkittävimpanä voidaan Suomen oloissa pitää ulkolämpötilaa. Lämpötilan ollessa alhainen verkon kokema sähkökuorma on suurimmillaan. Kesäisin lämmitys ei kuormita verkkoa, mutta kuumina ja aurinkoisina kesäpäivinä ilmastoinnin kuluttama energia voi olla merkittävää paikallisesti. Lämpötilan lisäksi ilmankosteus

vaikuttaa lämmitystarpeeseen, sillä korkea ilmankosteus lisää lämmityksen tarvetta. Lämmitystarpeeseen vaikuttaa myös tuulisuus. (Mutanen 2010; Seppälä 1996)

Asiakasryhmien sekä aika- ja ilmastotekijöiden lisäksi kuormitukset riippuvat sähkökuormien keskinäisistä vaikutuksista. Esimerkiksi käytettäessä useita elektroniikkalaitteita samanaikaisesti tarve sähkölämmitykselle vähenee, sillä laitteet lämmittävät sisäilmaa huomattavasti. Sähkökuormien keskinäisten vaikutusten lisäksi aiempien vuosien kuormitustiedot tulee huomioida ennustettaessa tulevia kuormia. Käytettäessä vanhoja kuormitustietoja ennusteiden tekemisessä ennustemallista saadaan luotettavampi. (Seppälä 1996)

Asiakkaiden sähkökuormiin vaikuttaa myös kulutuspuoleisen maantieteellinen sijainti. Esimerkiksi Pohjois-Suomessa sähköä kuluu eteläistä Suomea enemmän lämmitykseen kylmemmän talven takia. Sijainnin lisäksi AMR -mittarin kuormatietoon vaikuttaa mittausväli. Mittalaite voi tallentaa tietoa esimerkiksi 5, 15 tai 60 minuutin välein. Nykyään kuormitusmallien muodostaminen perustuu tunneittaiseen mittausdataan, mutta tulevaisuudessa voidaan siirtyä lyhyempään mittausväliin. Mittausintervallin lyhentämisestä ei kuitenkaan ole merkittävää hyötyä, sillä kulutuksen satunnaishajonta lisääntyy mittausvälin pienentyessä. (Seppälä 1996)

### 3.2 Kuormien lämpötilariippuvuus

Vaikka lämmitystarpeeseen vaikuttavat ulkolämpötilan lisäksi muun muassa auringon säteily, ilman kosteus ja paine sekä tuulisuus, kuormitusmalleja muodostettaessa näitä tekijöitä ei kuitenkaan nykypäivänä oteta huomioon. Mikäli kaikki ilmastolliset tekijät huomioitaisiin kuormamalleja rakennettaessa, mallinnuksesta tulisi entistä monimutkaisempaa. Tämän ongelman vuoksi kuormamalleja rakennettaessa huomioidaan ainoastaan ulkolämpötila, jonka vaikutus on tilastollisesti merkittävin. (Jalonen et al. 2003)

Suomalaisessa jakeluverkossa käytetään yksinkertaista lineaarista mallia kuvaamaan lämpötilariippuvuutta. Mallin perustana ovat kuorman ja lämpötilan poikkeamat odotusarvoistaan. Yksinkertaisuutensa vuoksi malli on käytännöllinen ja helposti sovellettavissa. Lisäksi malli antaa riittävän tarkan arvion kuorman riippuvuudesta ulkolämpötilaan. Tässä mallissa kuorma ja sen muutos ovat suoraan verrannollisia ulkolämpötilaan ja sitä voidaan kuvata yhtälön 3.1 mukaisella mallilla (Jalonen et al. 2003; Mutanen 2010):

$$\Delta P(t) = \alpha \cdot (T_{ave} - E[T(t)]) \cdot E[P(t)], \quad (3.1)$$

jossa  $\Delta P(t)$  on ulkolämpötilasta riippuva kuorma ajanhetkellä  $t$ ,  
 $T_{ave}$  on edellisen vuorokauden keskimääräinen ulkolämpötila,

$E[T(t)]$  on ulkolämpötilan odotusarvo ajanhetkellä  $t$  (ulkolämpötilan pitkäaikainen keskiarvo),

$\alpha$  on lämpötilariippuvuusparametri [%/°C]

$E[P(t)]$  on kuormituksen odotusarvo ajanhetkellä  $t$ .

Kuorman lämpötilariippuvuuden malli perustuu päivittäisiin keskilämpötiloihin. Mitattavan päivän keskilämpötilaa ei kuitenkaan tiedetä, joten mallissa käytetään edellisen päivän arvoa tai lämpötilaennustetta seuraavan päivän kuormitusennusteita tehtäessä. Näitä parempi arvio saadaan kuitenkin käyttämällä edellisen päivän sijaan edellisen 24 tunnin keskilämpötilaa, sillä tunneittaiset energiat korreloivat paremmin tässä tapauksessa. Käytettäessä edellisen 24 tunnin keskiarvoa saadaan tarkemmat lämpötilakorjaukset sekä aamulle että illalle, sillä edellisen päivän keskilämpötilaa käytettäessä päivän viimeisille tunneille ei saada riittävän tarkkaa korjausta. Mallissa ei ole huomioitu vuorokauden sisäisiä lämpötilariippuvuuden vaihteluista, jotta mallista on saatu helposti hallittava sekä ymmärrettävä. (Jalonen et al. 2003; Mutanen 2010)

Mallia rakennettaessa kerroin  $\alpha$  tulee valita oikein, jotta malli antaa riittävän tarkan arvion kuormasta. Kuorman lämpötilariippuvuus voidaan laskea kullekin asiakasryhmälle tehdyistä AMR -mittauksista, jolloin parametri on mahdollisimman ajankohtainen. Tyypillisesti sähkölämmitteisessä omakotitalossa lämpötilariippuvuus on noin 3-4 %/°C. Lisäksi AMR -mittaukset saadaan aluekohtaisesti, jolloin alueelliset lämpötilaerot voidaan huomioida mallia rakennettaessa. (Mutanen 2010) Kuormituksen odotusarvo voidaan arvioida aiemmin muodostetusta kuormituskäyristä. Lisäksi keskilämpötila sekä ulkolämpötilan odotusarvo lasketaan jokaiselle kuukaudelle erikseen, jotta malli olisi pätevä jokaiselle vuodelle. (Jalonen et al. 2003)

Kuorman lämpötilariippuvuutta kuvataan usein lähes lineaarisena, vaikka todellisuudessa tämä ei pidä paikkaansa. Ulkolämpötilan ollessa alimmillaan sähkön kulutus on suurimmillaan, mutta myös kuumina kesäpäivinä kulutus on suurta ilmastonin käytön seurauksena. Lisäksi keväisin ja syksyisin käytetään lisälämmittimiä, kuten esimerkiksi auton lämmittimet, lämpötilan laskiessa riittävän alas. Myös kylminä kesäpäivinä sähkölämmitys saatetaan kytkeä päälle esimerkiksi vähentämään sisäilman kosteutta. Jotta lineaarista mallia ulkolämpötilasta ja kuormasta voidaan käyttää, vuosi tulee jakaa lämpötilan mukaan esimerkiksi kuukausittaisiin tai vuodenaikakohtaisiin osiin. Vuodenaikakohtaisessa mallissa on neljä ja kuukausittaisessa 12 lämpötilasta riippuvaa parametria. (Jalonen et al. 2003; Mutanen 2010)

Laskettaessa lämpötilariippuvuuskertoimia lineaarisella regressiolla vuosi- ja päiväenergioista päivittäiselle energian kulutukselle, on huomioitava erot kuukausittain ja päivittäin kulutettavissa energioissa. Kuukausittaiset erot muodostuvat etenkin lämmitystarpeen vaihteluista eri vuodenaikojen mukaan. Päivittäiseen kulutukseen puolestaan vaikuttavat viikonpäivä sekä päivätyyppi. (Mutanen 2010)



Lämpötilan epälineaarisuuden lisäksi pitää huomioida ulkolämpötilan vaikutuksessa oleva viive. Lämpötilan laskiessa tai noustessa vaikutus ei näy välittömästi kuormituksessa, vaan viive on muutamasta tunnista muutamaan vuorokauteen. Esimerkiksi erittäin kylmän talvijakson jälkeen asiakkaiden lämmitys ei vähene välittömästi, vaan kuormitus säilyy korkeana jonkin aikaa. Lisäksi ohjattavat kuormat muuttavat lämpötilariippuvuutta. Varaavat lämmittimet kytketään usein verkkoon sähkön hinnan alentuessa (kaksiaikatariffi), jolloin ne eivät välttämättä ole suoraan lämpötilasta riippuvaisia. Lämpötilariippuvuuden kuvaaminen vaikeutuu entisestään, mikäli verkkoyhtiö ohjailee asiakkaan kuormaa kysynnän joustolla. (Jalonen et al. 2003)

### 3.3 Sähkökäyttäjien luokittelu

Sähkökäyttäjät jaotellaan ryhmiin erilaisten kulutustottumusten lisäksi suuren käyttäjämäärän vuoksi. Käyttäjät luokitellaan, jotta tiedon kerääminen ja laskentaparametrien muodostaminen olisi helpompaa. Tämä jaottelu edellyttää jakeluverkkoyhtiöltä tietoa siitä, mihin ryhmään kukin asiakas kuuluu. Ryhmien muodostamisessa on huomioitava yhden luokan koko sekä minimoitava vaihtelu ryhmän sisällä, jotta saadaan mahdollisimman tarkkoja kuormamalleja. Asiakkaiden luokitteluun onkin tutkimusten perusteella muodostunut sääntöjä, joiden avulla asiakkaat luokitellaan. Luokan koon ja sisäisen vaihtelun lisäksi luokittelun tulee olla mahdollisimman edustavaa. (Seppälä 1996)

Vaikka asiakkaiden luokittelussa pyritään minimoimaan vaihtelu yksittäisen luokan sisällä, yksittäisen sähkön käyttäjän kuormasta saadaan vain arvio. Lisäksi tämä menetelmä sisältää useita virhelähteitä, jotka vaikuttavat mallien luotettavuuteen. SENERin (1992) menetelmän parametrit perustuvat yli 20 vuotta sitten mitattuihin kuormituksiin, minkä seurauksena ne eivät toimi nykyisillä kuormituksilla. Lisäksi mittauksissa voi olla myös luokittelemattomien käyttäjien kuormatietoja. Näytteiden virheen lisäksi vanhoissa malleissa on käytetty maantieteellistä yleistystä, jossa sekä kaupunki että maaseutu ovat samanarvoisia. Tämän yleistyksen seurauksena menetelmässä esiintyy epätarkkuutta. Menetelmä ei myöskään huomioi sähkökäyttäjän mahdollista muutosta esimerkiksi lämmitystavan suhteen, vaan kerran luokiteltu käyttäjä pysyy samassa luokassa kuormituksessa tapahtuneista muutoksista huolimatta. (Jalonen et al. 2003; Mutanen 2010)

Virheiden takia vanhat kuormitusmallit ja asiakkaiden sijoittuminen käyttäjäryhmiin tulisi uusia AMR -mittauksista saatavan tiedon avulla. AMR -mittarit antavat tarkan kuormitustiedon sähkökäyttäjältä, jolloin asiakkaat voidaan luokitella paremmin. Tämä luokittelu voidaan tehdä klusteroinnin avulla. (Mutanen 2010)

Helpoin tapa uusia asiakasluokittelu on päivittää vanhat ryhmät. Tässä tavassa asiakkaat sijoitetaan kuormituskäyttäytymisen mukaan parhaiten kuormaa kuvaavaan luokkaan. Pelkällä uudelleenluokittelulla ei kuitenkaan saada asiakasluokista tarpeeksi

tarkkoja, vaan sen lisäksi tarvitaan klusterointia, jossa ryhmien päivittämisen lisäksi päivitetään kuormituskäyrät. Klusterointimenetelmiä on useita, mutta asiakkaiden luokitteluun käytettäviä menetelmiä ovat esimerkiksi k-means ja ISODATA. K-means-menetelmässä yksittäiset käyttäjät sijoitetaan luokkaan (klusteriin), joka on lähimpänä kyseisen asiakkaan kuormituskäyttäytymistä. Algoritmin avulla klustereille lasketaan keskimääräiset kuormitukset. ISODATA -menetelmä on k-means -menetelmästä muunneltu kehittyneempi algoritmi klustereiden muodostamiseen ja sähkökäyttäjien luokitteluun. Tässä menetelmässä algoritmi laskee automaattisesti klustereiden lukumäärän. (Mutanen 2010)

Näistä algoritmipohjaisista klusterointimenetelmistä k-means on yksinkertaisempi ja vaatii tietokoneelta vähemmän kapasiteettia. Tässä menetelmässä ainoa pakollinen muuttuja on klustereiden lukumäärä. Vastaavasti ISODATA -menetelmässä vaaditaan enemmän parametreja, jotta klustereiden hajottaminen ja yhdistäminen onnistuisi ja saavutettaisiin haluttu lopputulos. Molempien menetelmien lopputulos eli asiakasryhmien määrä riippuu halutusta tarkkuudesta. Klusteroinnin jälkeen ei kuitenkaan tiedetä, miten asiakkaat ovat jakautuneet klustereihin. Yksittäisessä klusterissa voi olla esimerkiksi sekä pieniasiakkaita että pieniä yrityksiä, joiden kuormitus on samankaltaista. Ongelma voidaan ratkaista nimeämällä klusteroinnin tuloksena saadut luokat sisältöä kuvaavasti. Tämä toimenpide todistaa, ettei klusteroinnilla päästä kuitenkaan eroon tarpeesta kerätä ja tallentaa asiakastyypitietoja. (Mutanen 2010)

### 3.4 Kuormitusten mallintaminen

Ennen nykyisiä kuormitusmalleja huipputehojen laskemiseen ja arvioimiseen käytettiin Velanderin kaavaa,

$$P_{max} = k_1 \cdot W + k_2 \cdot \sqrt{W} \quad (3.2)$$

jossa  $P_{max}$  on huipputeho [kW],  
 $k_1$  ja  $k_2$  ovat Velanderin kertoimet ja  
 $W$  on vuosienergia [MWh].

Velanderin kertoimet määritetään jokaiselle sähkökäyttäjärühmille erikseen mitattujen tietojen perusteella. (Lakervi & Partanen 2008)

Käytännössä tämä kaava ei kuitenkaan anna tarkkoja kuormitusarvoja eri käyttäjärühmille, sillä se sisältää liikaa oletuksia. Kaavan avulla saadaan melko tarkka arvio kuormituksen huipputehosta suurille sähkökäyttäjärühmille, mutta yksittäisen kuluttajan tapauksessa kaavan tarkkuus ei ole riittävä. Huippukuormituksen lisäksi olisi tiedettävä kuorman ajallinen vaihtelu, jotta tarkan mallin muodostaminen olisi mahdollista. Tätä

ominaisuutta Velanderin kaavassa ei ole.

Velanderin kaavaa tarkemmat kuormitusmallit saadaan tarkastelemalla eri sähkönkäyttäjien sähkön kulutustottumuksia sekä kuormituksen ajallista vaihtelua. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sähkönkäyttäjät jaetaan ryhmiin kulutuksen perusteella. Huippukuormituksen lisäksi tarkastellaan tuntikohtaisia tehonvaihteluja, tuntitehojen hajontaa sekä kuorman lämpötilariippuvuutta. Tämän tuntikohtaisen tarkastelun mahdollistavat AMR -mittarit. (Lakervi & Partanen 2008)

Kuormitusmallien kehitysmahdollisuudet ovat nopeutuneet viimeisen 10 vuoden aikana huomattavasti AMR -mittareiden yleistyttyä. Vanhat, yli 20 vuotta sitten muodostetut mallit perustuivat erillismittauksiin. Näissä malleissa käytettiin 46 kuluttajaryhmää. Kuormitusmallit on esitetty topografioina, joissa jokaiselle tunnille on määritetty tehon odotusarvo ja hajonta. Nämä topografiat on normalisoitu vastaamaan 10 MWh vuosikulutusta ja niitä käytettäessä kuormitusmallit tulee skaalata vastaamaan asiakkaan todellista vuosienergiaa. Muuttuneen sähkön kulutuksen sekä sähkölaitteiden määrän lisääntymisen vuoksi vanhat mallit antavat nykypäivänä vain karkean arvion kuormituksesta. (Seppälä 1996)

Nykypäivänä kuormitusmallit muodostetaan AMR -mittauksista, jolloin mallien määrittämiseen vaaditaan useita välivaiheita. Kohdetiedot ja AMR -mittareilta saatava kuormitusdata yhdistetään tietokantaan, jossa osa mittaustiedoista suodatetaan pois. Suodatetun mittausdatan, kohdetietojen sekä vuosienergian kulutusarvion perusteella analysoidaan mittaustietoja. Kuormitusmallien luominen vaatii analysoitujen mittaustietojen lisäksi tiedon lämpötiloista kyseisen vuoden aikana. Oleellinen osa kuormitusmallien luomista on myös keski- ja huipputehojen laskeminen. Yksittäisille asiakkaille voidaan laskea myös tilastollinen huipputeho huippukuorman suuruuden ja ajankohdan määrittämiseksi. Tämä huipputeho voidaan laskea seuraavasti:

$$P_{max} = P_i + z_a \cdot \sigma, \quad (3.3)$$

jossa  $P_{max}$  on huipputeho,  
 $P_i$  on kuluttajan  $i$  tuntikeskiteho ja  
 $z_a$  on ylitystodennäköisyyttä  $a$  vastaava korjauskerroin.

Ylitystodennäköisyydellä  $a$  tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla huipputeho ylittää lasketun tehon. Taulukossa 3.1 on esitetty joitain ylitystodennäköisyyden arvoja. Esimerkiksi ylitystodennäköisyyden ollessa  $a = 1$  % korjauskertoimen arvo on 2,32. (Lakervi & Partanen 2008)

**Taulukko 5.1** Ylitystodennäköisyyksiä joillain todennäköisyyksillä (Lakervi & Partanen 2008)

korjauskerroin $z_a$	Todennäköisyys, ettei huipputeho ylitä laskettua tehoa ( $=1-a$ )
0	0.5
0.68	0.75
1	0.84
1.65	0.95
2	0.97
2.32	0.99

Tarkasteltaessa suurempaa asiakasryhmää tuntikeskitehojen kokonaishajonta pienenee ja kuormitusennuste tarkentuu. Tällaiselle asiakasryhmälle tuntikeskitehot voidaan laskea tilastomatematiikan avulla yksittäisten kuluttajien tuntitehojen summana yhtälön 3.4 mukaisesti. Vastaavasti ryhmän tehojen hajonnat voidaan laskea yhtälöllä 3.5. (Lakervi & Partanen 2008; Mutanen 2008)

$$P_{ryhmä,t} = \sum_{i=1}^m P_{it} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{ryhmä,t} = \sqrt{\sigma_{it}^2 + \sigma_{jt}^2 + \dots + \sigma_{nt}^2} \quad (3.5)$$

Näissä  $P_{ryhmä,t}$  on ryhmän tuntikeskiteho ajanhetkellä  $t$ ,

$P_{it}$  on kuluttajan  $i$  keskiteho ajanhetkellä  $t$ ,

$\sigma_{ryhmä,t}$  on tuntikeskitehojen hajonta ajanhetkellä  $t$  ja

$\sigma_{it}$  on kuluttajan  $i, j, \dots, n$  tuntikeskitehon hajonta ajanhetkellä  $t$ .

Keskiteho ei kuitenkaan kerro päivän huippukuormasta mitään. Lisäksi huipputehot vaihtelevat huomattavasti yksittäisten sähkökäyttäjien välillä, vaikka päivittäinen keskiteho olisi samansuuruinen. Huipputehon laskemisella saadaan arvio huippukuorman suuruudesta sekä sen ajankohdasta. Huipputehojen määrittystä ja tehojen hajontaa tarvitaan erityisesti suunniteltaessa ja mitoitettaessa pienjänniteverkkoa. Huipputeho voidaan laskea keskitehoista asiakasryhmälle vastaavasti kuin yksittäisen asiakkaan tapauksessa yhtälön 3.6 avulla:

$$P_{max} = P_{ryhmä} + z_a \cdot \sigma \quad (3.6).$$

Sähkökäyttäjien tehontarpeet vaihtelevat keski- ja huipputehon tavoin. Yksittäisten kuluttajien huippukuormat eivät yleensä ajoitu samaan hetkeen. Verkon kuormituskaan ei yleensä ole huippukuormien summa missään tilanteessa, vaan laajemman verkon kuormitus on tasaisempaa tehojen risteilyn ansiosta. (Lakervi & Partanen 2008)

### 3.5 Yksilölliset kuormitusmallit

AMR -mittareiden yleistymisen myötä voidaan luoda ennusteita yksittäisten sähkökäyttäjien kuormituksista, vaikka verkkoyhtiöiden kannalta käyttäjäryhmät ovatkin helpompia hallita. Jos edellisen vuoden mittauksia käytetään suoraan seuraavan vuoden kuormitusennusteena, ne eivät välttämättä anna tarkkaa tietoa tulevasta sähkökuormista. Tähän virheeseen löytyy monia tekijöitä, kuten esimerkiksi muutokset ulkolämpötilassa. Joka talvi ei ole yhtä kylmä ja kesähelteetkään eivät ajoitu samoille päiville vuosittain. Nämä muutokset näkyvät suoraan asiakkaiden sähkökuormissa. Lisäksi juhlapyhien ajoittuminen vaikuttaa kuormitukseen. Pääsiäisen ajankohta vaihtelee maaliskuun alusta huhtikuun loppuun vuosittain, ja joulukuu voi ajoittua arkipäiviin tai viikonloppuun. Sähkökuormissa esiintyy myös satunnaisuutta, jota ei voida ennustaa. AMR -mittausten tarjoamaa tietoa voidaan kuitenkin hyödyntää vuosittaisista muutostekijöistä huolimatta. Ennusteiden avulla voidaan arvioida tulevaa kuormitusta ja varautua mahdollisiin kuormitushuippuihin. Lisäksi kuormitusmalleissa voidaan huomioida ulkolämpötilan muutokset edellisen vuoden mittauksiin nähden, jolloin saadaan perusteltu arvio tulevasta kuormasta.

Muodostettaessa yksilöllistä kuormitusennustetta aluksi huomioidaan ulkolämpötilan vaikutus eri vuodenaajoille luvussa 3.2 kuvatulla tavalla. Tämän toimenpiteen jälkeen muutetaan lämpötilariippuvuuden avulla edellisen vuoden mitattu kuormitustieto vastaamaan pitkän aikavälin keskiarvolämpötilan mukaista kuormitusta. Kuormituksen normalisoinnin jälkeen jokaiselle kuukaudelle lasketaan keskimääräinen viikkokuormitus, joka kuvaa kyseisen kuukauden jokaista viikkoa mahdollisimman hyvin. Seuraavaksi nämä tyyppiviikot yhdistetään malliksi, jonka tarkoituksena on kuvata koko vuoden kuormitusta. Lopuksi tämä malli skaalataan kuvaamaan asiakkaan odotettua energian vuosikulutusta. Yksilöllisestä kuormitusennusteesta tulee yleensä sitä tarkempi mitä useamman vuoden ajalta mittausdataa on käytettävissä. (Mutanen 2010)

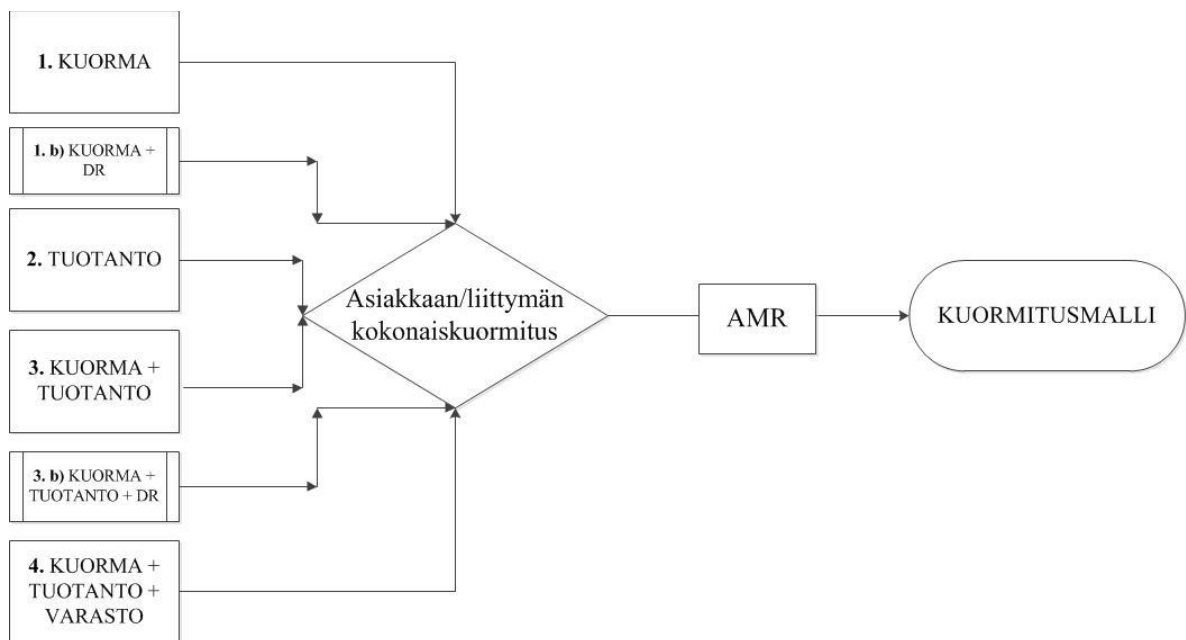
Tutkimukset ovat osoittaneet, että yksilöllisten kuormitusmallien luominen ei ole kannattavaa pienten sähkökäyttäjien tapauksessa, sillä klusteroinnilla päästään samoihin tarkkuuksiin ennusteissa pienten kuormitusten tapauksessa. Yksilölliset kuormitusmallit ovat kannattavia vasta suuremmilla kulutusyksiköillä. Pienillä kuormituksilla sähkön kulutuksessa on suurta ajallista vaihtelua, jota ei voida ennustaa, joten tarkkojen yksilöllisten mallien rakentaminen on vaikeaa. Pienikäyttäjien tapauksessa vaadittaisiin AMR -mittausdataa usean vuoden ajalta, jotta ennusteen tarkkuus olisi riittävän paljon

tarkempi kuin klusteroinnin lopputulos. Suurempien kuormien tapauksessa ennustaminen on helpompaa vähäisemmän satunnaisvaihtelun ja lämpötilariippuvuuden takia. Esimerkiksi teollisuudessa tuotanto ei ole juurikaan riippuvainen ulkolämpötilasta, sillä energiaa ei kulu lämmitykseen samassa suhteessa kuin esimerkiksi omakotitalossa. (Mutanen 2010)

## 4 ERILAISET KUORMITUSVAIHTOEHDOT

Nykyiset kuormitusmallit on muodostettu suoraan mittaustiedon perusteella olettaen, että kaikissa kohteissa on pelkkää kulutusta. Suurimmassa osassa talouksia AMR -mittarit mittaavatkin vain kohteessa kulutetun energian. On kuitenkin myös asiakkaita, jolla mittaustiedot sisältää kulutuksen lisäksi muita tekijöitä, kuten esimerkiksi omaa tuotantoa tai kysynnän jouston vaikutuksia. Tällöin kuormitusmallien lukumäärä kasvaa moninkertaiseksi huomioitaessa kaikki vaihtoehdot, sillä nykyiset, luvussa 3 esitetyt pelkälle kuormalle muodostetut mallit eivät kuvaa riittävällä tarkkuudella esimerkiksi kuorman ja tuotannon yhdistelmätapauksia.

Tarkasteltaessa erilaisia AMR -mittarin mittaamia tapauksia voidaan erottaa neljä toisistaan poikkeavaa vaihtoehtoa. Kohteessa voi olla joko pelkkää kuormaa tai tuotantoa. Kolmas vaihtoehto on kuorman ja tuotannon yhdistelmä ja neljännessä vaihtoehdossa näiden kahden lisäksi käytetään sähkövarastoa. Näiden neljän vaihtoehdon lisäksi sekä pelkän kuorman että kuorman ja tuotannon kanssa voi olla kysynnän joustoa. Nämä tapaukset luokitellaan alakäsitteiksi kuvan 4.1 osoittamalla tavalla. Kuvassa 4.1 on esitetty kaikki vaihtoehdot AMR -mittariin tulevasta tiedosta. AMR -mittauksista kerättävällä tiedolla pitäisi pystyä mallintamaan tulevaisuudessa kaikki vaihtoehdot.



*Kuva 4.1 Mahdolliset kuormitusvaihtoehdot*

Yksittäisten komponenttien tarkastelulla pyritään luomaan malli hajautetun tuotannon ja kysynnän jouston vaikutuksista kohteiden kuormituksiin. Yksittäisten kohteiden tarkastelemisen tavoitteena onkin luoda mahdollisimman hyviä ennustemalleja kyseisistä kohteista, vaikka verkon kannalta kiinnostavampia ovat kokonaisuudet. Nykyisiin malleihin vaadittavat muutokset ovat tulevaisuuden kannalta ehdottomia, jotta verkon hallinta on mahdollista. (Koreneff 2010)

Verkkoyhtiön kannalta on tärkeää, että asiakkaat ilmoittavat oman tuotannon asentamisesta. Ilman ilmoitusta verkkoyhtiö käsittelee kaikki kohteet pelkkää kuormaa sisältävinä kohteina, jolloin kuormitusennusteisiin syntyy suuria virheitä. Verkkoyhtiö voisi mahdollisesti pystyä määrittämään AMR -mittauksista tällaiset tuotannon lisäykset, jolloin erillistä ilmoitusta ei tarvittaisi. Kaikkia yksityiskohtia kuormitusmalleihin ja asiakastietojärjestelmiin ei voida lisätä, mutta suurimmat virhetekijät, kuten esimerkiksi sähköautot, lämpöpumput sekä oma tuotanto tulee huomioida omana vaikutustekijänään. Lisäksi sähkön kulutuksen muutos vaikuttaa kuormitusmalleihin ja ennusteisiin. Esimerkiksi sähkön käytön tehostuminen uusien sähkölaitteiden ja energiatehokkuuden myötä vaikuttavat kulutukseen. Myös valaistuksen energian käytön tehostuminen led-valojen ja energiansäästölamppujen myötä vaikuttaa etenkin talviaikana asiakkaiden kulutuksiin. (Koreneff 2010)

Uusien kuormitustyyppien ja energian käytön tehostumisen lisäksi sähkön kulutustottumukset muuttuvat tällä hetkellä nopeasti. Sähköautot tulevat yleistymään seuraavien vuosikymmenien aikana, minkä seurauksena sähkökuorma kasvaa merkittävästi, vaikka autojen lataus kestää muutamia tunteja kerralla. Lataushetket muodostavat kuitenkin merkittävän kulutuspiikin, jota ei voida mallintaa eikä ennustaa nykyisillä kuormitusmalleilla. Malleissa tulee huomioida muun muassa ihmisten ajomäärien muutos eri vuodenaikoina (kesä ja talvi) sekä viikonpäivinä. Lisäksi vuosien energian kulutuksessa tapahtuva kasvu sähköautojen myötä vaikeuttaa mallien käyttämistä. Näiden ongelmia takia yksittäisen sähkölämmitteisen omakotitalomallin rinnalle tulee rakentaa muun muassa sähköautomahdollisuuden sisältävä kuormamalli. (Koreneff 2010; Rautiainen et al. 2012)

Sähköautoja mallinettaessa on huomioitava useita muuttujia, kuten esimerkiksi akun varastoimiskapasiteetti ja lataustehokkuus. Lisäksi ihmisten ajamistottumukset ja vuosittaiset ajokilometrit ovat erilaisia. Sähköautojen lataus tapahtuu pääasiallisesti kotona ja työpaikalla, mutta ladatuissa tehoissa saattaa olla suuria vaihteluita. Lataus kuitenkin halutaan yleensä suorittaa mahdollisimman nopeasti. Lisäksi asiakkaat voidaan luokitella muun kuormituksen ja asumistyyppin mukaisesti. Tällöin voidaan olettaa, että samanlaiset asumismuodot ovat verrannollisia toisiinsa ja käyttävät autoa samoin. (Rautiainen et al. 2012)

Sähköautojen lisäksi toinen merkittävä muutos on lämpöpumppujen lisääntynyt käyttö. Sähköautoista poiketen lämpöpumput voivat joko kuluttaa tai tuottaa energiaa muista lämmityslähteistä riippuen. Lisäksi lämpöpumppujen sähkön kulutus on



voimakkaasti riippuvainen säästä. Kovalla pakkasella lämpöpumput käyttäytyvät kuin tavallinen sähkölämmityskohde. Ilmalämpöpumppujen tapauksessa kohteen sähkön kulutus vähenee, mutta asiakkaan ei tarvitse kuitenkaan ilmoittaa kuorman muutoksesta sähköyhtiölle. Yhtiö käyttää tällöin vanhoja malleja kyseisen kohteen mallintamiseen, jolloin kuormitusennusteisiin tulee merkittäviä virheitä. (Koreneff 2010)

Uusien kuormitusmallien rakentaminen voidaan tehdä kahdella eri tavalla: luodaan täysin uudet kuormitusmallit eri vaihtoehdoille tai lisätään nykyiseen malliin uusia ”rakennuspalikoita”. Tällaisia palikoita voisivat olla esimerkiksi sähköautot sekä oma tuotanto. Rakennuspalikoita käytettäessä päästäisiin pienemmällä työllä, mutta mallien tarkkuus saattaa kärsiä sekä kysynnän jouston mallintaminen saattaa aiheuttaa ongelmia. Toisaalta uusien mallien rakentaminen on työläämpää, mutta näissä malleissa voidaan huomioida helpommin myös muun muassa kysynnän jousto. (Koreneff 2010; Rautiainen et al. 2012)

## 4.1 Kuorman mallinnus

Nykyiset kuormitusmallit on laadittu kohteille, joissa ei ole kuorman lisäksi muita mittauksiin vaikuttavia tekijöitä. Yleisin kuormitustyyppi tällä hetkellä onkin kotitalous, jossa on pelkkää kuormaa. Kohteet, joissa kuorman lisäksi on tuotantoa, ovat kuitenkin yleistymässä. Myös kysynnän jouston käyttöönotto muuttaa asiakkaiden kuormituskäyttäytymistä merkittävästi, ja vanhat mallit eivät ole enää yleispäteviä. Tämän muutoksen seurauksena jokaiselle uudelle kuormitustyyppille on muodostettava oma malli, jonka avulla kuormia pystytään ennustamaan mahdollisimman tarkasti. Mallien rakentamisessa voidaan esimerkiksi hyödyntää osakuormituksia, kuten ilmalämpöpumppu, joita lisätään ja vähennetään nykyisiin kuormitusmalleihin (Koreneff 2010).

Pelkkää kuormaa mittaavassa kohteessa AMR -mittari kertoo suoraan kohteen kuormituksen. Kuormitustietojen lisäksi kuormitusmallia rakennettaessa on huomioitava ulkolämpötila luvussa 3.2 kuvatulla tavalla. Lämpötilatiedot mallia varten voidaan saada esimerkiksi Ilmatieteen laitokselta kohteen maantieteellisen sijainnin perusteella. AMR-mittari ei kuitenkaan pysty erottelemaan mahdollisia kuorman ohjaustoimenpiteitä ja kysynnän jousto.

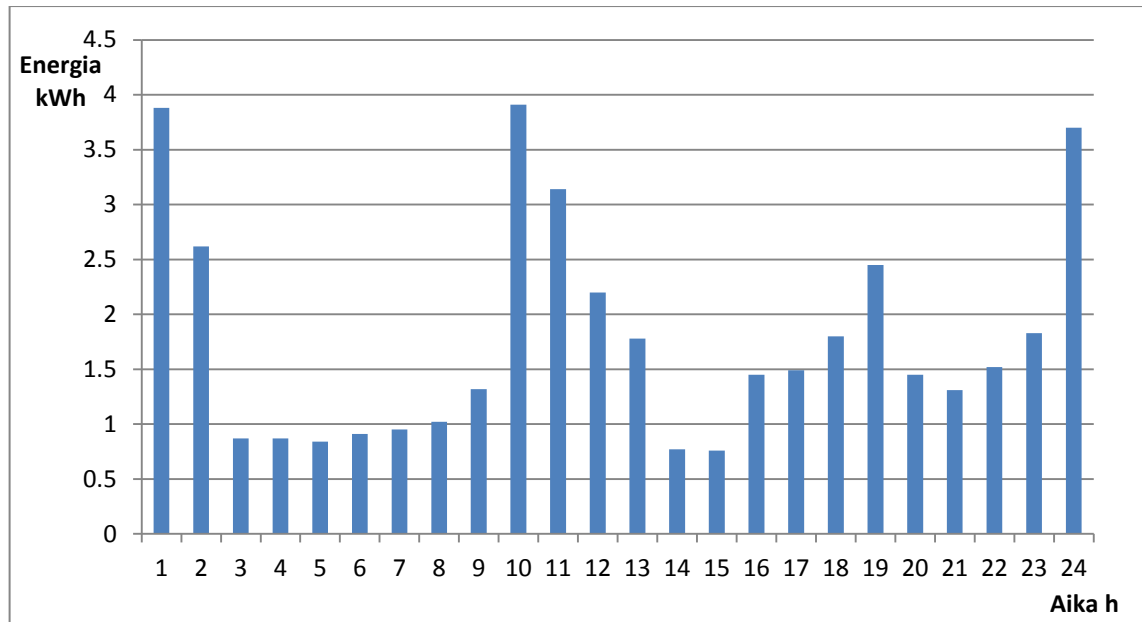
Perinteisen kulutuskohteen kuormituskäyrissä näkyvät suoraan esimerkiksi sähkölämmityksen käynnistyminen sekä asukkaiden päivärytmi. Aamulla sähkön kulutus kasvaa aamutoimien vuoksi. Mikäli asukkaat lähtevät aamulla töihin, sähkön kulutus on vähäistä aamu- ja keskipäivän ajan, mutta kulutus kasvaa merkittävästi asukkaiden palatessa kotiin. Varaavasta sähkölämmityksestä aiheutuva sähkön kulutuksen merkittävä nousu ajoittuu useimmilla asiakkailta iltaan tai yöhön, halvemman sähkön ajankohtaan. Lisäksi sähkökiukaan vaikutus kulutukseen näkyy erityisesti lauantai-iltaisina, jolloin useat sähkönkäyttäjät kytkevät kiukaan päälle lähes samanaikaisesti.

Lisäksi eri kotitalousasiakkaiden kuormituskäyrien avulla voidaan myös päätellä asiakkaan lämmitystyyppi, joista yleisin on suora sähkölämmitys. Lämmitystyyppit tulevat lähiaikoina muuttumaan, sillä sähköinen lattialämmitys on yleistymässä uusien rakennusten lisäksi myös vanhoilla kaukolämpöasiakkailla. Lämmitykseen käytetään myös lämpöpumppuja. Lämpöpumppu voi perinteisen ilmalämpöpumpun sijaan olla esimerkiksi poistoilma-, ilma-vesi- tai maalämpöpumppu. Nämä lämpöpumppuvaihtoehdot yhdistettynä perinteisiin sähkölämmitystapoihin muuttavat lämmityksestä syntyvää kuormaa merkittävästi. (Koreneff 2010)

Nykyiset kuormitusmallit eivät kuitenkaan tule olemaan riittävän luotettavia tulevaisuudessa, sillä esimerkiksi sähköautojen lataaminen tulee muuttamaan kuormitusta. Sähköautojen osalta kuormituksen suuruus riippuu voimakkaasti siitä, onko kyseessä täyssähkö- vai hybridauto. Kotilatauksen osalta autotyypillä ei ole merkitystä, sillä latauskuorman ero on melko pieni. Ladattava teho on kuitenkin merkittävä suhteessa pieniasiakkaan kokonaiskulutukseen. Aluksi sähköautojen lataaminen tulee tapahtumaan suoraan pistokkeesta ilman ohjausta, mutta tulevaisuudessa kysynnän joustolla tullaan myös ohjaamaan latausta. Latausta voidaan ohjata joko kulutuksen tai sähkön hinnan mukaan. Sähköautojen latausta tarkasteltaessa on huomioitava myös latauksen mahdollisuus muuallakin kuin asiakkaan kotona. Lataus voi tapahtua esimerkiksi työpaikalla, jolloin tämänkin kohteen tarkastelu muuttuu. Työpaikoilla tapahtuva lataus lisää kuormitusta keskipäivään. (Koreneff 2010; Rautiainen et al. 2012)

Sähköautojen lisäksi kysynnän jouston toteuttaminen muuttaa esimerkiksi lämmitysajankohtia. Lämmityksen kytkeminen verkkoon ja lämmön varaaminen tulee tapahtumaan halvimman sähkön aikaan. Kysynnän joustolla siirretään lämmitysajankohtaa myöhemmäksi osassa kohteita, jotta verkon kuormitus olisi tasaisempaa. Kysynnän jouston suurin potentiaali onkin sähköautojen latauksessa ja sähkölämmityksessä. Myös lämpöpumput saattavat ulottua kysynnän jouston piiriin tulevaisuudessa. (Koreneff 2010)

Kuvan 4.2 esimerkki havainnollistaa yksittäisen kotitalousasiakkaan kuormitusta eräältä syyskuiselta lauantailta, jolloin sähkön kokonaiskulutus on ollut noin 43 kWh päivässä. Kuvasta 4.2 voidaan päätellä viikonpäivä ilman tarkempaakin tietoa, sillä aamun kulutushuippu sijoittuu vasta kello yhdeksän jälkeen. Lisäksi sähkön kulutus on aamupäivällä useamman tunnin keskimääräistä suurempaa, mikä johtunee ruuanlaitosta. Myös illalla seitsemän aikaan on selkeä kulutushuippu. Kuormitushuiput yöaikaan johtuvat sähkölämmityksen kytkeytymisestä päälle.



*Kuva 4.2 Sähkön kulutus pelkkää kuormaa mittaavassa kotitaloudessa*

## 4.2 Kuorman ja kysynnän jouston mallinnus

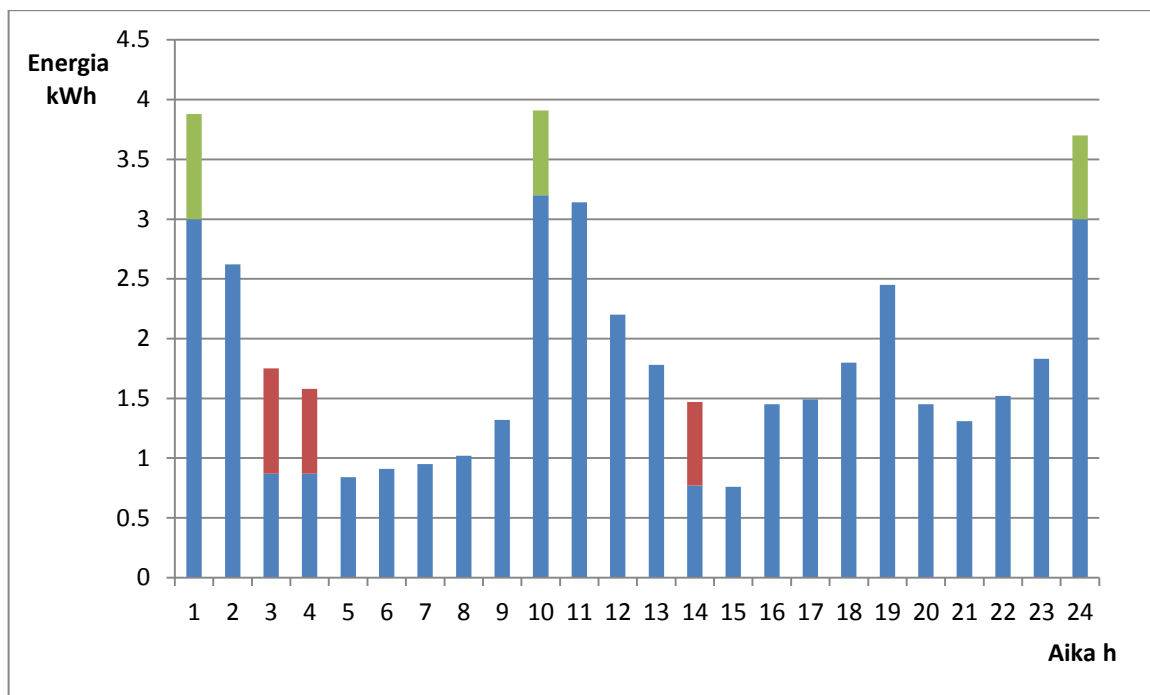
Pelkkää kuormaa sisältävässä kohteessa kuormaa voidaan ohjata kysynnän joustolla. Ohjaustoimenpiteet eivät näy kohteen energian kulutuksessa, vaan sen ajankohdassa. Tällaisessa tilanteessa perinteiset kuormamallit eivät ennusta tulevaa kuormaa luotettavasti. Nykyiset mallit voivat ennustaa kuorman oikein tilanteessa, jossa kysynnän joustolla tehdään ainoastaan pieniä muutoksia kuorman ajankohtaan, mutta suurten leikkausten tapauksessa ennusteet eivät toimi. Lisäksi kysynnän jousto voidaan tehdä joko tehon tai hinnan perusteella, jolloin ennustaminen vaikeutuu entisestään.

Jotta voidaan rakentaa luotettava malli kysynnän jouston ja kuorman yhdistelmälle, mallia muodostettaessa tulee tietää ne ajankohdat kuormituksessa, jolloin kuormaa on leikattu ja kuorma palautettu takaisin. Mikäli kohteesta on käytettävissä kuormitustietoa vuosilta, jolloin kysynnän joustoa ei ole käytetty kuormituskäyristä voidaan päätellä ajanhetket, jolloin kuormitukseen on tehty muutoksia. Lisäksi vanhojen käyrien avulla voidaan arvioida kuorman palautushetket. Vanhoja mittaustietoja tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon, että kulutustottumukset ovat saattaneet muuttua vuosien varrella, joten käyriä on analysoitava kriittisesti. Lisäksi mallia muodostettaessa on otettava huomioon lämpötilavaihtelut eri vuosien välillä. Tilanteissa, joissa aiempaa mittaustietoa ei ole saatavilla kuormituskäyristä voidaan arvioida muiden samankaltaisten kohdetietojen avulla kysynnän jouston toteutusajankohta.

Kysynnän jouston arviointiin voidaan käyttää myös sähkön hinnan vaihteluita tapauksessa, jossa kuormaa on ohjattu hinnan perusteella. Sähkön hintakäyrien sekä kohteen kuormituskäyrien avulla voidaan muodostaa malli kuvaamaan ja ennustamaan

hintaohjattua kysynnän joustoa kohteessa, jossa on pelkkää kuormaa. Hintakäyrien käyttö perustuu oletukseen, että kuormaa leikataan sähkön hinnan ollessa korkeimmillaan. Lisäksi pitää tehdä oletus, että leikattu kuorma palautetaan verkkoon sähkön hinnan ollessa alhaisimmillaan. Hinnalle voidaan myös asettaa jokin raja, jonka alapuolella leikattu kuorma kytketään automaattisesti takaisin. Tämä toimenpide helpottaa uuden mallin rakentamista.

Kuva 4.3 havainnollistaa kysynnän jouston toteutumista kuvan 4.2 esimerkkitaloudessa. Kuvien 4.3–4.6 tarkastelut ovat hypoteettisia, ja niiden pohjana on käytetty kuvan 4.2 asiakasta. Kysynnän joustolla on kuvan 4.2 kuormituksesta leikattu tunneilta 1, 10 ja 24 (vihreät palkit) tehoa, ja nämä kuormat on palautettu takaisin pienemmän kuormituksen tunneille 3,4 ja 14 (punaiset palkit). Tunnilta 10 ei ole leikattu huippukuormaa yhtä paljoa kuin tunneilta 1 ja 24, sillä tämä vaikuttaisi merkittävästi asiakkaan asumismukavuuteen. Kuormaa on palautettu tässä tapauksessa myös iltapäivän tunnille, sillä esimerkiksi pyykin- ja astianpesukoneen käyttö voidaan siirtää muutamalla tunnilla myöhemmäksi huippukuormituksen ajankohdasta. Yöajalle näitä kuormia ei kannata siirtää, sillä molemmat kodinkoneet tyhjenetään yleensä heti käytön jälkeen. Tässä esimerkissä kuormaa on siirretty vuorokauden sisällä eri ajankohtaan melko vähän (2,29 kWh), jotta toimenpide vaikuttaisi asiakkaan normaaliin asumiseen mahdollisimman vähän. Lisäksi kuorma olisi voitu palauttaa useammalle tunnille pienempinä kuormina.



*Kuva 4.3 Kysynnän jouston toteutuminen kotitaloudessa*

### 4.3 Tuotannon mallintaminen

AMR -mittarilla voidaan mitata myös pelkkää tuotantoa, joka voidaan verkon kannalta kuvata negatiivisena kuormana. Hajautetun tuotannon yleistyessä kuormituskäyrien muodostaminen myös tuotannolle tulee tarpeelliseksi, sillä jakeluverkon hallinta ja mallinnus edellyttävät myös hajautetun tuotannon mallintamista. Pienjännitetasolla todennäköisimmät vaihtoehdot ovat tällä hetkellä aurinko- ja tuulivoima sekä biokaasukäyttöiset mikroturbiinit ja pienet bioenergiaa käyttävät CHP -voimalat. Suomen olosuhteissa pienen kokoluokan CHP -laitokset eivät tällä hetkellä näytä kannattavilta, sillä polttoaineen saatavuus riittävän läheltä laitosta on vaikeaa, ja kuljetuskustannusten nousu rajoittaa laitoksen kannattavuutta huomattavasti. Kaikille vaihtoehtoisille tuotantoyksiköille ei kuitenkaan ole tarvetta kuormitusmallien muodostamiseen, sillä simulointimallit antavat riittävän tarkkoja tuotantokäyriä (Koreneff 2010).

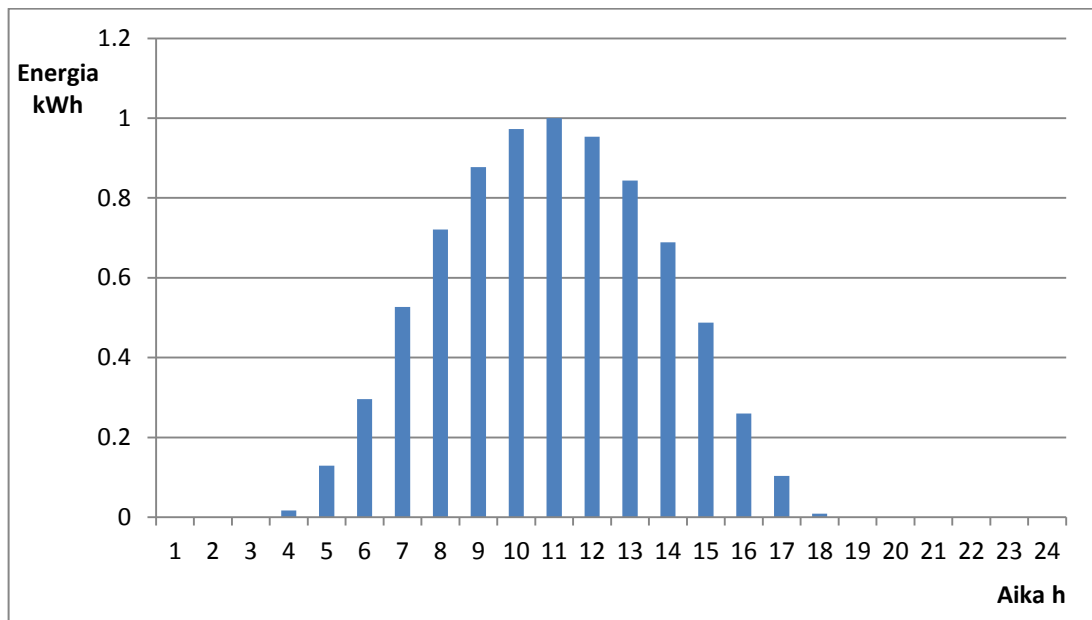
Tuotantokäyrien lisäksi hajautettu tuotanto vaikuttaa järjestelmien joustavuuteen. Esimerkiksi tuulivoiman tapauksessa hetkellisesti voimala voi tuottaa paljon energiaa, jolloin tarvitaan myös uutta säätövoimaa. Säätövoiman rakentaminen on kallista, joten tuulivoiman hallitsemiseen vaaditaan kysynnän joustoa, kuorman ohjausta sekä energiavarastoja. Näillä toimenpiteillä vältytään säätövoiman rakentamiselta. Älykkään sähköverkon oletetaan toimivan joustavasti, jolloin se ohjaisi järjestelmää tällaisissa tilanteissa. Verkon joustava toiminta edellyttää toimivia ja tarkkoja kuormituskäyriä. (Koreneff 2010)

Tuotantokäyrien muodostamiseen vaikuttaa monia tekijöitä. Esimerkiksi tuulivoiman tapauksessa kuorman mallinnus on hankalaa tuotannon satunnaisuuden takia. Tuulivoiman tapauksessa keskitehon mallintaminen antaa riittävän tarkan arvion, sillä näin päästään pienempään ennustevirheeseen (Koreneff 2010). Tuulen nopeusjakaumia ja keskinopeuksia voidaan analysoida esimerkiksi Suomen Tuuliatlaksen avulla. Tuuliatlas tarjoaa tietoa paikkakuntaakohtaisesti, jolloin voidaan saada hyvin tarkkoja arvioita tuulen nopeuksista ja tuulivoimalan tuottamista tehoista. Aurinkopaneelien tapauksessa suurin vaikuttava tekijä on auringon säteily, mutta myös ulkolämpötilalla on vaikutusta tuotettuun sähkötehoon. Auringon säteilystä voidaan luoda riippuvuusmalli, aurinkoisuustekijä, joka on suoraan verrannollinen paneelin tuotantoon.

Tuotantoa voidaan myös ohjata verkon kuormituksen perusteella. Huippukuorman aikana hajautettua tuotantoa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon. Tällä toimenpiteellä voidaan taata sähkön saatavuus myös kuormituksen ollessa suurimmillaan. Kysynnän joustolla ohjataan siis sitä, minne tuotettu energia ohjataan. Kysynnän joustolla voidaan myös ohjata hajautettua tuotantoa varastoon, mikäli voimalan yhteyteen tai lähiseudulle on integroitu sähkövarasto. Lisäksi ohjaus mahdollistaa varaston purkamisen haluttuna ajankohtana, kuten esimerkiksi huippukuorman tai sähkökatkon aikana. Hajautettua energian tuotantoa voidaan myös käyttää varavoimana jakeluverkon

vikatilanteissa.

Kuvan 4.4 esimerkissä on esitetty pinta-alaltaan 10 m<sup>2</sup> kokoisen aurinkopaneelijärjestelmän tuottama energia eräänä syyskuisena päivänä. Aurinkopaneelien hyötysuhteeksi on oletettu 17 %. Kuvasta 4.4 voitaisiin myös päätellä vuodenajaksi alkusyksy, sillä paneelit ovat tuottaneet energiaa noin 13 tunnin ajan. Kuvasta 4.4 voidaan havaita, että päivä on ollut aurinkoinen, sillä parhaimmillaan järjestelmä on tuottanut noin kilowattitunnin (1 kWh) verran energiaa. Koko vuorokauden aikana paneelit ovat tuottaneet energiaa noin 8 kWh. Tällä energiamäärällä voitaisiin kattaa noin 18 % kuvan 4.2 asiakkaan kuormituksesta.



*Kuva 4.4 Aurinkopaneelin tuottama energia*

#### 4.4 Kuorma ja tuotanto

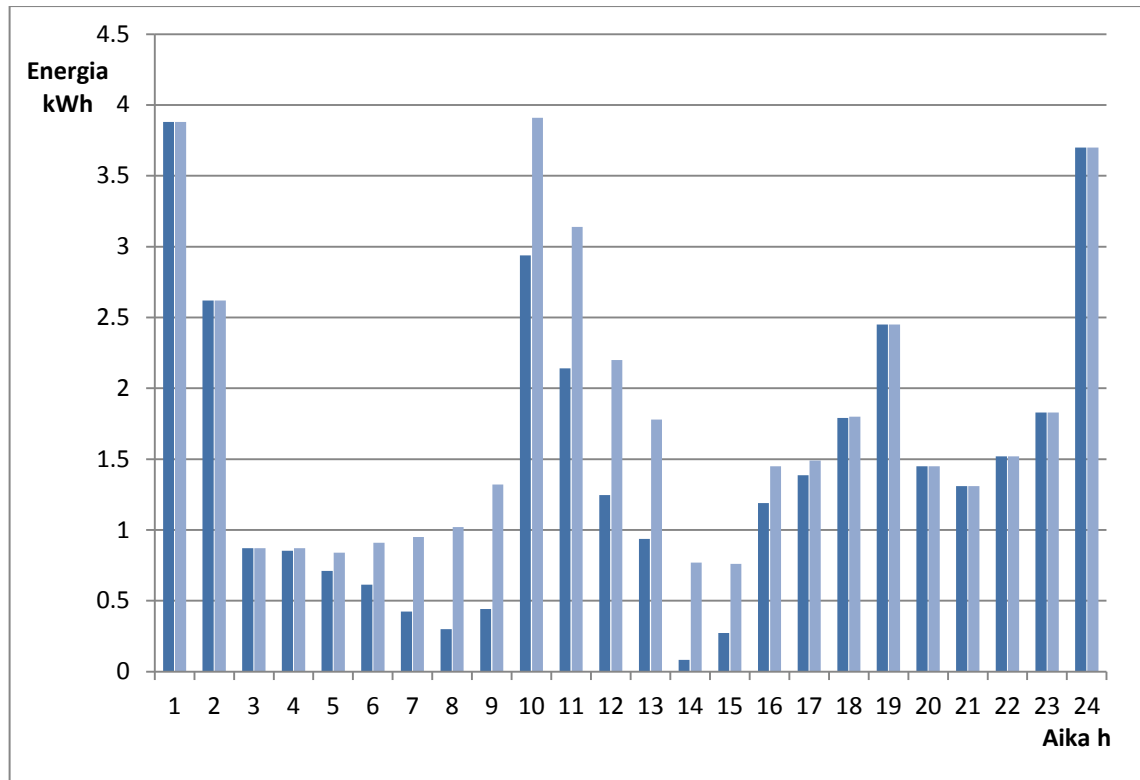
Kohteet, joissa on sekä kuormaa että tuotantoa ovat yleistymässä uusiutuvaan energiaan pohjautuvan teknologian kehityksen myötä. Yleisimpiä pientalon yhteyteen liitettäviä energian tuottajia ovat aurinkopaneelit sekä pientuulivoimalat. Kohteen oma tuotanto vähentää verkosta siirrettävän sähkön määrää, ja tämä näkyy kuormituskäyrissä energian kulutuksessa. AMR -mittarissa näkyy kuitenkin kuorman ja tuotannon summa, joten pelkkää kuormaa mallintava kuormitusennuste ei ole pätevä.

Muodostettaessa kuormamallia kuorman ja tuotannon yhdistävälle kohteelle on huomioitava tuotannon suuruus. Tällä hetkellä AMR -mittauksilla saadaan tieto vain kuorman ja tuotannon yhdistelmästä, joten tuotannon suuruutta tulee arvioida muilla tavoin. Tulevaisuudessa pienten tuotantoyksiköiden yhteyteen saatetaan lisätä oma mittari, joka mittaa vain tuotannon suuruutta. Tällöin tuotantoa ei tarvitse enää arvioida. Nykypäivänä

tuotannon määrää voidaan arvioida esimerkiksi tuotantoyksikön nimellistehon avulla. Mikäli kohteessa on aurinkopaneeleja tai pientuulivoimala, tuotannon suuruutta voidaan arvioida myös sääolosuhteiden perusteella. Kohteessa voi olla myös lämpöpumppu, joka tuottaa lämpöä. Esimerkiksi käytettäessä maalämpöpumppua, pumppu kuluttaa lämmönsiirtämiseen vaadittavan energian verran sähköä, mutta saatu lämpö vähentää sähkölämmityksen tarvetta. Maalämpöpumpun tarkoituksena on tuottaa enemmän lämpöä kuin kuluttaa sähköä. Ilmalämpöpumpun tapauksessa lämmityksen tarve vähenee.

Aurinkopaneeleilla ja pientuulivoimalalla tuotettua energiaa tarkasteltaessa on otettava huomioon myös se, että niiden tuotanto ei ajoitu tasaisesti koko päivälle. Aurinkopaneelien tapauksessa auringon säteily rajoittuu tiettyyn vuorokauden aikaan, ja Suomessa säteilyn vaihtelu on suurta vuodenaikojen välillä. Talvisin aurinkopaneeleilla tuotetun energian määrä on vähäistä päivän pituuden ollessa lyhimmillään, mutta kesällä paneelit voivat parhaimmillaan tuottaa sähköä lähes koko päivän ajan. Tuulivoimalan tapauksessa tuotettu energia riippuu tuulisuudesta, joten vaihtelu voi olla suurta päivän sisällä. Tuulivoimalan tuotantoon vaikuttavat sekä vuoden että vuorokauden aika. Esimerkiksi syksyisin tuulen nopeudet ovat keskimääräisesti korkeammat kuin kesällä lounaisten ilmapvirtausten ansiosta (Suomen Tuuliatlas 2013). Suurten vuorokausivaihteluiden vuoksi sähkövarastojen käyttö mahdollistaisi oman tuotannon hyödyntämisen myös niinä aikoina, kun tuotantoyksikkö ei tuota energiaa.

Kuvassa 4.5 on esitetty kuormaa ja tuotantoa sisältävä kulutuskohte, jonka kuormana on esimerkkitapauksena esitetyn kuvan 4.2 asiakkaan kuorma ja tuotantona kuvan 4.4 mukainen aurinkopaneeli. Kuvat 4.2 ja 4.4 on summattu yhteen kuvaan 4.5. Tämä tarkoittaa sitä, että aurinkopaneeleilla tuotettu energia käytetään suoraan kuormassa. Tällöin oma tuotanto alentaa verkosta ostettavan sähkömäärää, mutta sen käyttöajankohtaan ei voida vaikuttaa. Tummansinisellä on kuvattu kuorman ja tuotannon summaa ja vaaleansinisellä alkuperäistä kuormaa. Kuvasta 4.5 huomataan, että aurinkopaneelien tuottamalla sähköllä pystytään lähes täyttämään tunnin 14 sähkötarve. Lisäksi paneelien tuottama energia alentaa tuntien 10 ja 11 kulutuspiikkejä huomattavasti. Ilman sähkövarastoa aurinkopaneeleilla ei kuitenkaan pystytä pienentämään yöajan huippukuormituksia.



**Kuva 4.5** Kuorman ja tuotannon yhdistelmädiagrammi

Rakennettaessa kuormitusmallia tällaiselle kohteelle voidaan käyttää useampaa vaihtoehtoa. Malli voidaan luoda vertaamalla aikaisempien vuosien kuormituskäyriä nykyisiin, jolloin oman tuotannon vaikutus on helpommin havaittavissa. Toisaalta mallia voidaan lähteä rakentamaan nykyisen kuormituskäyrän ja tuotantokäyrien avulla. Tässä vaihtoehdossa oletetaan tuotantoyksikön tuottama energia ja summataan se kuormituskäyrään, jolloin saadaan uusi käyrä. Tämä käyrä kertoo kohteen kulutuksen tilanteessa, jossa on omaa tuotantoa, jolloin voidaan soveltaa nykyisiä kuormitusmalleja. Ennusteiden virheet saattavat kuitenkin olla liian suuria oletusten vuoksi.

Kuormaa ja tuotantoa sisältävässä kulutuskohteessa voidaan myös soveltaa kysynnän joustoa. Korkean sähkön hinnan tai kulutuksen aikana kohteessa pyritään käyttämään itse tuotettua energiaa mahdollisimman paljon, mikäli se on mahdollista ilman sähkövarastoa. Kysynnän joustolla leikataan tällaisessa tilanteessa kuormitusta verkosta, mutta kokonaiskulutuksen suuruus ei välttämättä muutu oman tuotannon ansiosta. Oman tuotannon hyödyntämismahdollisuudet riippuvat etenkin aurinkopaneelien tapauksessa merkittävästi leikkausajankohdasta. Siinä tapauksessa, että kuormaa ohjataan tilanteessa, jossa omaa tuotantoa ei ole käytettävissä, esimerkiksi yöllä, kysynnän jousto toimii samoin kuin pelkän kuorman tapauksessa. Nämä mahdollisuudet vaikeuttavat kuormamallin muodostamisesta tällaiseen kohteeseen. Mallin luomiseksi tarvitaan tieto kuormasta, tuotannosta sekä ohjaustoimenpiteistä.



## 4.5 Kuorma, tuotanto ja sähkövarasto

Pien- ja mikrotuotannon yleistyessä myös tarve sähkön varastoinnille kasvaa. Uusiutuviin energialähteisiin perustuvilla tuotantoyksiköillä tuotetun energian määrä ja tuotannon ajankohta eivät ole vakioita, joten varastolla mahdollistetaan energian kulutus asiakkaan haluamina ajanhetkinä. Asiakas voi esimerkiksi purkaa varastonsa sähkön hinnan ollessa kalleimmillaan tai asunnon sähkön kulutuksen ollessa suurimmillaan. Varastojen energiaa voidaan käyttää myös niinä hetkinä, jolloin omaa tuotantoa ei ole. Sähkövarasto mahdollistaa myös sähkön käytön sähkökatkojen aikana, joten niitä voidaan pitää myös pienenä varavoiman lähteenä oman tuotannon lisäksi.

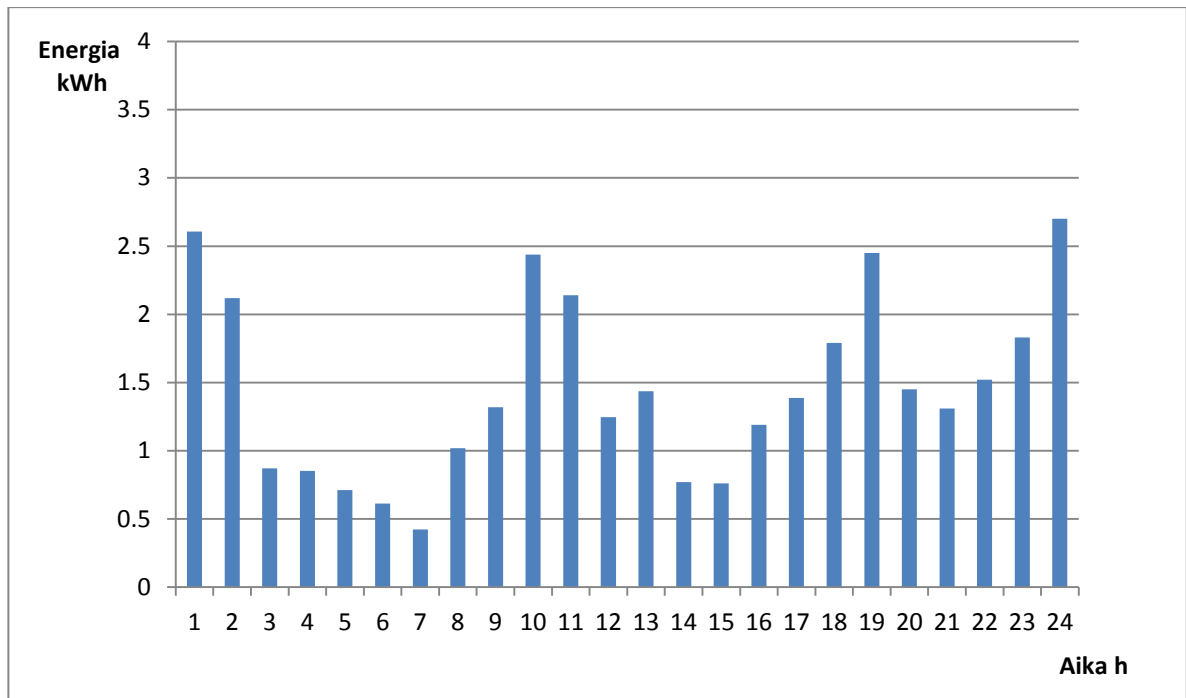
Aurinkopaneelien yhteydessä yleisin varastoratkaisu on akut, joiden purku on helppoa ja nopeaa tarvittaessa. Akkujen ainoana huonona puolena voidaan pitää niiden melko pientä varauskapasiteettia suhteessa niiden kokoon. Aurinkopaneelilla tuotettu sähkö voidaan käyttää myös esimerkiksi veden lämmittämiseen, jolloin sähkö varastoituu lämmöksi. Tämä toimenpide ei kuitenkaan ole kannattava, sillä pientalon yhteyteen voidaan rakentaa myös aurinkolämpöä hyödyntävä yksikkö, joka lämmittää suoraan käyttövetä sähkön tuotannon sijaan.

Lisäksi energiavarastoina voidaan pitää esimerkiksi lämminvesivaraajia sekä sähköautoja. Sähköautojen tapauksessa varastoja ei voida purkaa muiden varastojen tavoin, sillä akkujen varastoima energia käytetään pääsääntöisesti autoon. Tulevaisuudessa saattaa kuitenkin ohjauksen ja kysynnän jouston avulla olla mahdollista purkaa sähköautojen akkuja haluttuna ajanhetkenä. Ohjaustoimenpiteiden myötä myös sähköautojen lataus tulee ohjauksen piiriin, joten sähkön varastointiinkin tulee eräänlainen ohjausmahdollisuus. Sähköautojen latauksen ohjaamisessa on kuitenkin ongelmana, että akun tulisi olla täynnä, kun autolla halutaan lähteä ajamaan. Tulevaisuudessa myös polttokennojen vetyyn voidaan varastoida energiaa, mutta tämä teknologia on kuitenkin vielä kaupallisesti kannattamatonta.

Käytettäessä varastoa kuorman ja tuotannon lisäksi kohteen mallintamisesta tulee erittäin hankalaa muuttujien moninkertaistuessa. Kuormitusmallin muodostamiseksi tarvitaan tieto kuormituksesta, tuotannon suuruudesta sekä varastoitavan sähkön (tai lämmön) määrästä. Lisäksi vaaditaan tieto siitä, milloin sähköä varastoidaan ja milloin tuotettu sähkö kulutetaan kohteessa suoraan tai sähkövarasto puretaan. Sähkövaraston suuruusluokasta tulee myös olla arvio, jotta tiedetään, kuinka paljon varastosta voidaan kuluttaa energiaa maksimissaan.

Kuvassa 4.6 on havainnollistettu tilannetta, jossa kotitalouden yhteyteen on kytketty oman tuotannon lisäksi sähkövarasto, jonka varastoimiskapasiteetti on 10 kWh. Tilanteessa peruskuormana on kuvan 4.2 mukainen kulutus ja omana tuotantona kuvassa 4.4 esitetty aurinkopaneelien tuottama energia. Kuvasta 4.6 huomataan, että kuormitustilanne muuttuu selvästi kuvan 4.5 tilanteesta, kun paneelien yhteyteen liitetään sähkövarasto. Paneelien

tuottamaa energiaa on varastoitu yhteensä noin 3,3 kWh niiltä tunneilta, joina kotitalouden sähkön kulutus on ollut melko vähäistä (tunnit 8, 9, 13, 14 ja 15). Tämä energia on purettu varastosta niille ajanhetkille, jolloin asiakkaan sähkön kulutus on ollut suurimmillaan (tunnit 1, 2, 10 ja 24). Tällä toimenpiteellä asiakkaan kuormituksesta on saatu leikattua suurimmat kulutushuiput pois. Suuremmalla energian varastoinnilla kuormituksesta olisi saatu vielä tasaisempaa.



**Kuva 4.6** Kuorman, tuotannon ja varaston yhdistelmädiagrammi

Kuormituksen mallintamista tällaisella asiakkaalla voidaan vaikeuttaa vielä liittämällä kohteeseen kuorman ohjausmahdollisuus. Kuormaa voidaan ohjata joko teho- tai hintaperusteisesti, mutta tässä tilanteessa tuotannon lisäksi näkyy varaston purkaminen. Esimerkiksi huipputehoa leikattaessa oma tuotanto voidaan kohdistaa kattamaan leikatun sähkölaitteen energian kulutus. Lisäksi sähköiset varastot voidaan purkaa lisäenergiaksi, jolloin kysynnän joustolla leikattu energia ei näy kulutuksessa. Tällaisessa tilanteessa AMR-mittauksissa verkosta otettavan energian määrä vähenee ja ohjaustoimenpiteet näkyvät kuormituskäyrissä, mutta todellisuudessa kulutettu energia on mitattua suurempi. Kohteen kuluttaman energian suuruudesta voidaan tehdä arvioita lisäämällä mittausdataan tuotannon kapasiteetti sekä varaston/varastojen energian varastoimiskyky. Varastojen tapauksessa pitää tarkastella sekä sähkön- että lämmönvaraamiskykyä, mikäli kohteessa on mahdollisuus molempiin. Tuotantoa tarkasteltaessa pitää huomioida myös se, kuinka suuri osa tuotetusta energiasta on kulunut kohteessa suoraan ja kuinka paljon energiaa on varastoitu.

## 5 KUORMAN OHJAUKSEN VAIKUTUS TUNTITEHOMITTAUKSIIN

Kuorman ohjauksella pyritään siirtämään huippukuormaa pienemmän kulutuksen ajankohtaan, jolloin asiakkaan kuormitus tasoittuu. Kuorman ohjauksen ei kuitenkaan tulisi näkyä asiakkaan kokonaiskulutuksessa. Ohjauksen vaikutusta yksittäisen asiakkaan kuormituskäyttäytymiseen voidaan tarkastella sekä kuormitus- että pysyvyyskäyrien avulla. Tässä luvussa tarkastellaan yksittäistä kotitalousasiakasta, jolla on käytössä tehokaistapohjainen kuorman ohjaus, joka ohjaa kuormia tarvittaessa yhden minuutin toimintavälillä.

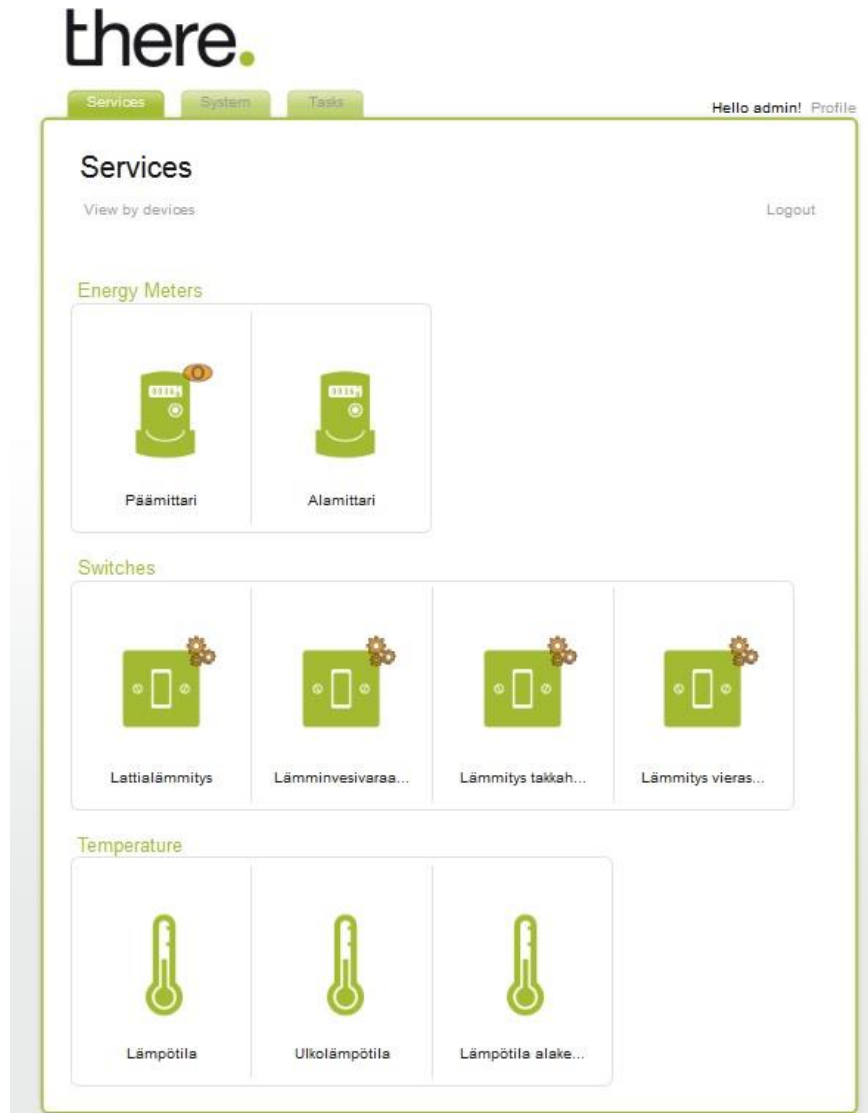
### 5.1 Tehokaistapilotin taustaa

Tässä työssä tarkasteltavan kotitalousasiakkaan tehokaistaan perustuva kuorman ohjaus pohjautuu Elenia Oy:n ja There Corporationin pilottihankkeeseen, jossa kotiautomaation avulla ohjataan osakuormia, esimerkiksi lattialämmityksiä. Ohjauksen perusideana on ohjata osakuormia sähkön kulutuksen ollessa suurimmillaan. Pilotissa on mukana yhteensä viisi asiakasta, joista tutkimuksen kohteeksi valittiin asiakas, jolla on eniten ohjattavia osakuormia. Kuormien ohjaus perustuu tehokaistaan sekä sähkön spot -hintaan. Spot-hintaan pohjautuva ohjaus perustuu sähkön markkinahintaan ja sen tavoitteena on kytkeä kuorma verkkoon sähkön hinnan ollessa alimmillaan, joten sitä voidaan pitää kysynnän hintajoustona. (Saarinen 2013)

Tehokaistalla puolestaan tarkoitetaan asiakkaan sähkön kulutuksen rajaamista tietyn tehorajan alapuolelle. Tehokaistan toiminta perustuu teho- ja hystereesirajaan. Tehorajalla tarkoitetaan kulutuksen maksimiarvoa, jonka ylittämisen jälkeen ohjattavia osakuormia kytketään irti verkosta. Asiakas määrittelee itse kuormien prioriteettijärjestyksen eli kuormien irtikytkemisjärjestyksen. Hystereesiarvolla puolestaan tarkoitetaan tehoa, jonka verran kulutuksen tulee laskea, jotta poistetut kuormat voidaan palauttaa verkkoon. Tehoraja kertoo myös tehokaistan leveyden. Teho- ja hystereesirajan valinta perustuu asiakkaan tehomittauksiin, jolloin se voidaan asettaa kulutusta mukailevaksi. (Saarinen 2013) Esimerkiksi tehorajan ollessa 6 kW ja hystereesirajan 1 kW tehokaistan leveys on 6 kW ja ohjattavat kuormat palautetaan takaisin tehon alitettua 5 kW.

Pilotin tärkein yksittäinen komponentti on ThereGate -yksikkö, joka ohjaa osakuormiin kytkettyjä katkaisijoita kokonaiskulutuksen kertovan AMR -mittauksen

mukaan. Kuormien ja AMR -mittauksen lisäksi tämä yksikkö lukee serveriltä sähkön spot-hinnat, joiden perusteella se ohjaa spot -ohjattuja kuormia. Kuvassa 5.1 on esitetty Theren pääkäyttöliittymä, jota asiakas voi tarkastella internetin kautta. Käyttöliittymän kautta asiakas saa reaaliaikaista tietoa sähkön kulutuksesta sekä katkaisijoiden toiminnasta.



**Kuva 5.1** Theren pääkäyttöliittymä

Pääkäyttöliittymästä asiakas pääsee tarkastelemaan mittauksien ja katkaisijatietojen lisäksi myös lämpötilamittauksia. Lisäksi käyttöliittymän kautta asiakas voi itse säätää teho- ja hystereesirajoja, mittausaikaväliä sekä katkaisijoiden toimintajärjestystä. Käyttöliittymä mahdollistaa mittausaikavälin säätämisen jopa viiteen sekuntiin, mutta ohjauksiin liittyvä päättyminen tehdään minuuttitasolla. Lisäksi minuuttitaso tarkastelu on riittävän tarkka kuormitusta tarkasteltaessa. Käyttöliittymästä asiakas voi ladata mittaus-, lämpötila- ja katkaisijatiedot erillisiin tiedostoihin tarkempaa tarkastelua varten. Tämä ominaisuus löytyy

erikseen jokaisen osakuorman, lämpötilamittauksen ja päämittarin alta. Pääkäyttöliittymän ulkonäkö on jokaisella asiakkaalla yksilöllinen, sillä se riippuu energiamittausten lisäksi katkaisijoiden ja lämpötilamittausten määrästä.

Kuvassa 5.2 on esitetty Theren mittausnäkö, johon pääsee käyttöliittymän etusivulta. Mittausnäköstä asiakas voi valita, haluaako tarkastella tehomittauksia tarkasti 5 sekunnin aikavälillä vai minuutti-, tunti- tai päivätasolla. Mittauksia voi tarkastella myös viikko-, kuukausi- tai vuositasolla.

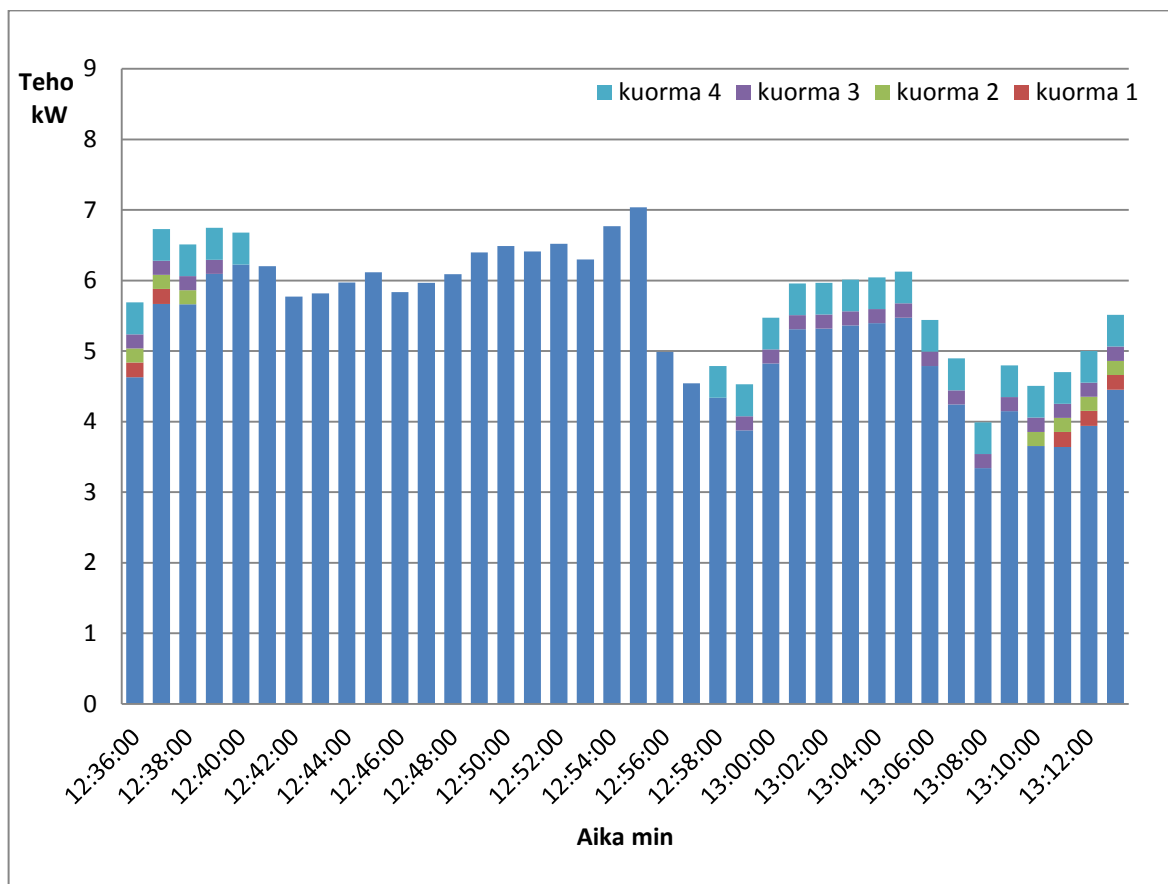


*Kuva 5.2 Minuuttitason mittausnäkö*

## 5.2 Tehokaistan toiminta

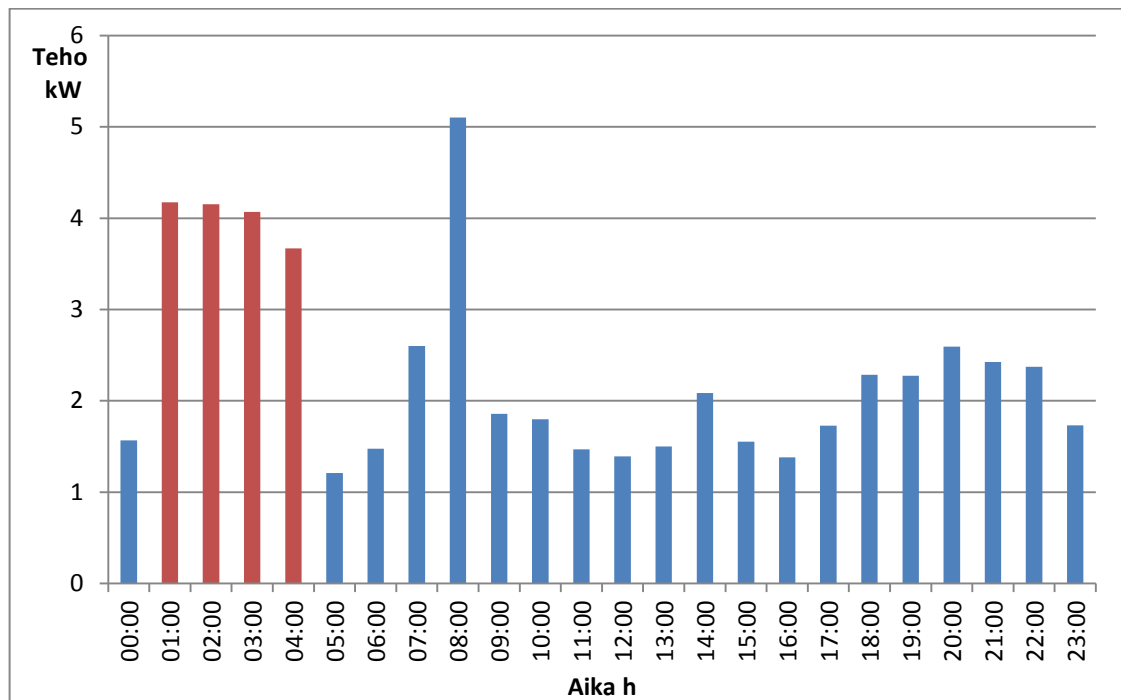
Tässä työssä tarkasteltavassa pilottikohteessa on yhteensä neljä ohjattavaa kuormaa, joilla ohjataan eri huoneiden lämmityksiä. Kuvassa 5.3 on havainnollistettu tehokaistaohjauksen toimintaa tammikuussa 2013. Tällöin tehoraja oli 6 kW ja hysteresisiraja 1 kW. Kuvaan 5.3 on eritelty kaikki neljä ohjattavaa kuormaa sekä peruskuorma. Kuvasta huomataan, että ajanhetkellä 12.37 kuormitus on ylittänyt tehorajan, jolloin ensimmäinen kuorma (1) on kytketty pois seuraavalla minuutilla. Huolimatta tästä toimenpiteestä asiakkaan kulutus on

ollut yli 6 kW, joten kaikki ohjattavat kuormat on leikattu seuraavien minuuttien aikana pois. Koska kuormitus ylitti edelleen tehorajan ja ohjattavia kuormia ei enää ollut, asiakkaalle lähetettiin asiasta ilmoitus joko tekstiviestillä tai sähköpostitse. Tällä toimenpiteellä tiedotetaan asiasta asiakkaalle, jotta tämä voi tehdä manuaalisia toimenpiteitä kulutuksen alentamiseksi. Kuvasta 5.3 huomataan, että kaikki kuormat ovat olleet poiskytkettyinä noin 10 minuuttia, ja ensimmäinen osakuorma (4) on palautettu takaisin kello 12.58. Ensimmäisen ja toisen osakuorman palauttamisessa ei ole ollut viivettä, mutta kuorman 3 tapauksessa on huomattavissa viivettä. Kuormitus on alittanut 5 kW:a kello 13.07, mutta kolmas osakuorma on palautettu takaisin vasta 13.10. Osakuormien 1 ja 2 palauttaminen on tapahtunut noin 10 minuuttia kahden ensimmäisen kuorman palauttamisesta, sillä asiakkaan kokonaiskulutus on ylittänyt 5 kW. Kuvasta 5.3 huomataan, että kaikkien osakuormien takaisinkytkeminen on tapahtunut noin puolessa tunnissa, joten lämpötilassa ei ole tapahtunut juurikaan muutoksia ja ohjauksesta ei ole aiheutunut suurta haittaa asiakkaalle.



**Kuva 5.3** Tehokaistaohjauksen toiminta 5.1.2013 kello 12.36–13.13

Tarkastelukohteessa käytetään tehokaistan lisäksi spot -ohjausta lämminvesivaraajalla. Lämminvesivaraaja kytketään päälle yöaikaan niiden tuntien ajaksi, jolloin sähkön spot -hintaa on alimmillaan. Kuvassa 5.4 on havainnollistettu spot -ohjauksen toimintaa eräänä helmikuun arkipäivänä. Punaisella värillä on kuvattu tunteja, jolloin lämminvesivaraaja on ollut toiminnassa. Lämminvesivaraajan toiminta-aika erottuu kuvasta 5.4 selkeästi, sillä asiakkaan kulutus on ollut edeltävinä tunteina alle 2 kW, mutta varaajan kytkeydyttyä päälle kello yhdeltä sähkön kulutus on noussut yli 4 kW:n. Myös lämminvesivaraajan poiskytketyminen viideltä näkyy kuvassa 5.4 sähkön kulutuksen selvänä alenemisena.



*Kuva 5.4 Spot -ohjauksen toiminta lämminvesivaraajalla*

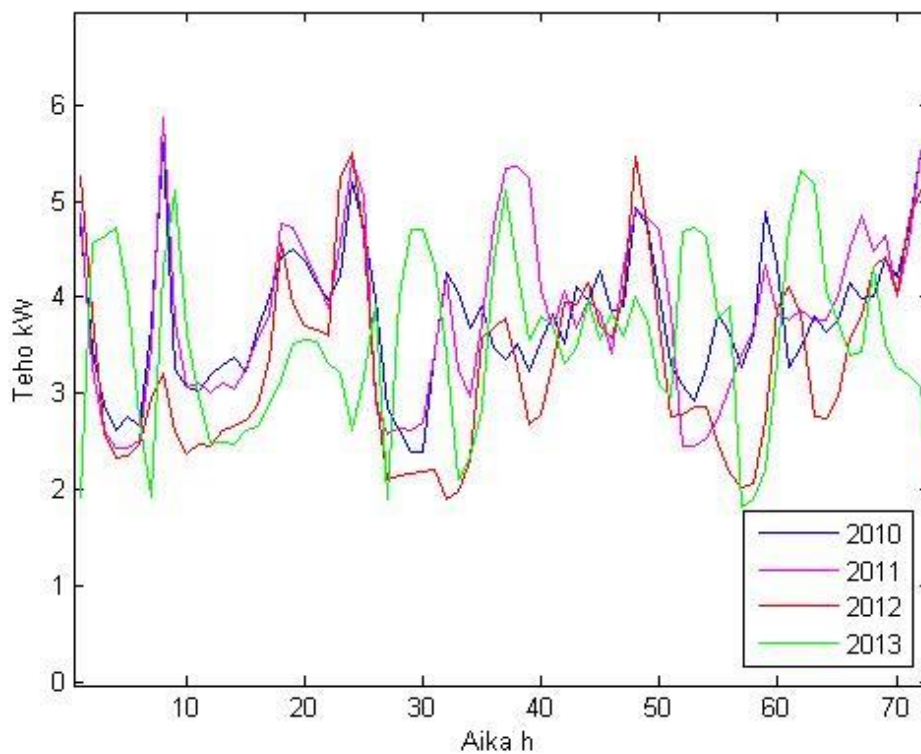
### 5.3 Kuorman ohjauksen näkyminen kuormituskäyrissä

Tarkasteltavassa kohteessa tehokaista ja lämminvesivaraajan spot -ohjaus otettiin käyttöön marraskuun 2012 lopussa. Ohjauksen vaikutuksia tarkastellaan talvikuukausina, joului-, tammi- ja helmikuun, ja muutoksia verrataan aikaisempien vuosien vastaaviin kuukausiin. Tällöin voidaan analysoida ohjauksen vaikutusta kuormitukseen.

Ajanjakson aikana kohteen tehokaistan tehorajaa ja hystereesiarvoa on muuteltu sopivan kaistan löytämiseksi, sillä tehokaistapohjainen ohjaus on vasta pilottivaiheessa. Hystereesiraja on ollut koko tarkastelujakson ajan 1 kW. Tehorajan arvo on vaihdellut välillä 5,5–20 kW, mutta yleisin raja-arvo on ollut 6 kW. Tehorajan vaihtelu voidaan perustella tehokaistan toiminnan testaamisella. Tehorajan suurinta arvoa 20 kW on käytetty

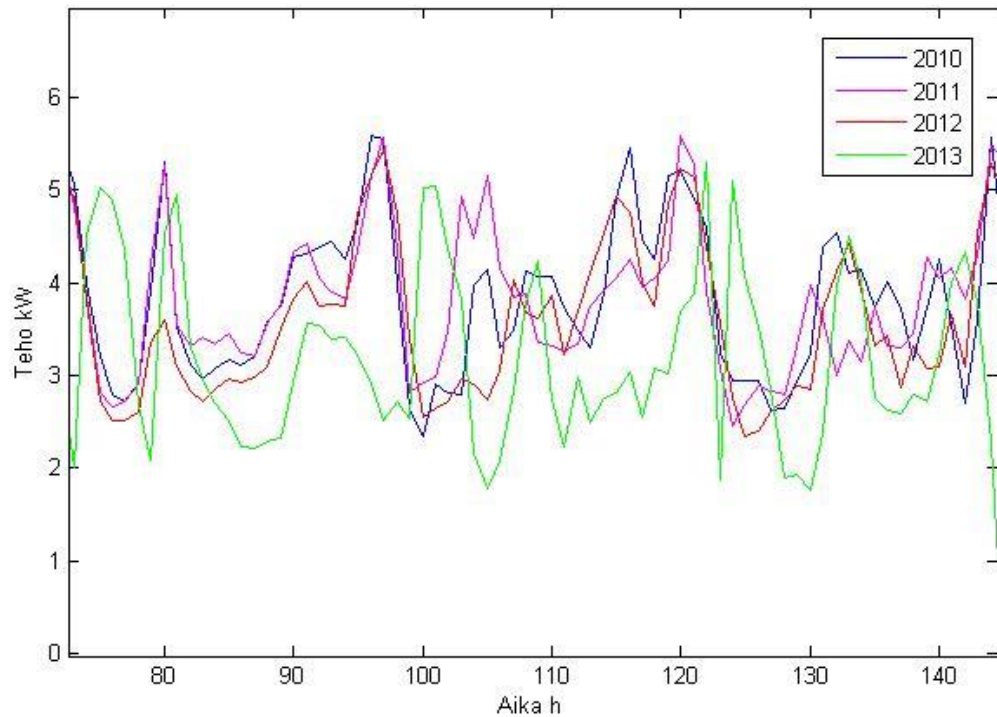
testaamaan pilotin toimintaa tilanteessa, jolloin ohjauksia ei ole ja pienintä arvoa 5,5 kW testaamaan ohjausten toimintaa kaikkien osakuormien ohjaamistilanteessa. Tehokaistan oikeanlaisen toiminnan kannalta tehorajan ja hystereesiarvon tulisi olla koko ajan vakioita, jotta muutokset olisivat selkeämmin nähtävissä. Lisäksi jokaiselle vuodenajalle voisi määritellä omat rajansa ulkolämpötilan vaihtelun mukaan. Esimerkiksi talvella rajojen pitäisi olla korkeammalla kuin kesällä lämmitystarpeen vuoksi.

Kuormituskäyrien tarkastelua ja analysointia varten eri vuosien mittaustiedoista muodostettiin luvussa 3.5 kuvatulla tavalla pilottiasiakasta kuvaavat yksilölliset kuormituskäyrät, joissa on huomioitu kuorman lämpötilariippuvuus. Kuvissa 5.5 ja 5.6 on havainnollistettu eri vuosien kuormituskäyttäytymistä tammī-helmikuussa. Kuvassa 5.5 kuormitusta on tarkasteltu eri päivätyyppien mukaan. Ensimmäiset 24 tuntia kuvaavat tyypillistä arkipäivää tammikuussa, seuraavat 24 tuntia tyypillistä lauantaita ja vastaavasti seuraavat 24 tuntia tyypillistä sunnuntaita. Vihreä käyrä edustaa ohjattua tapausta. Kuormituskäyrä voisi kuvata esimerkiksi tyypillistä viikonloppua perjantaista sunnuntaihin.



**Kuva 5.5** Kuormituskäyttäytyminen tammikuussa vuosina 2010–2013

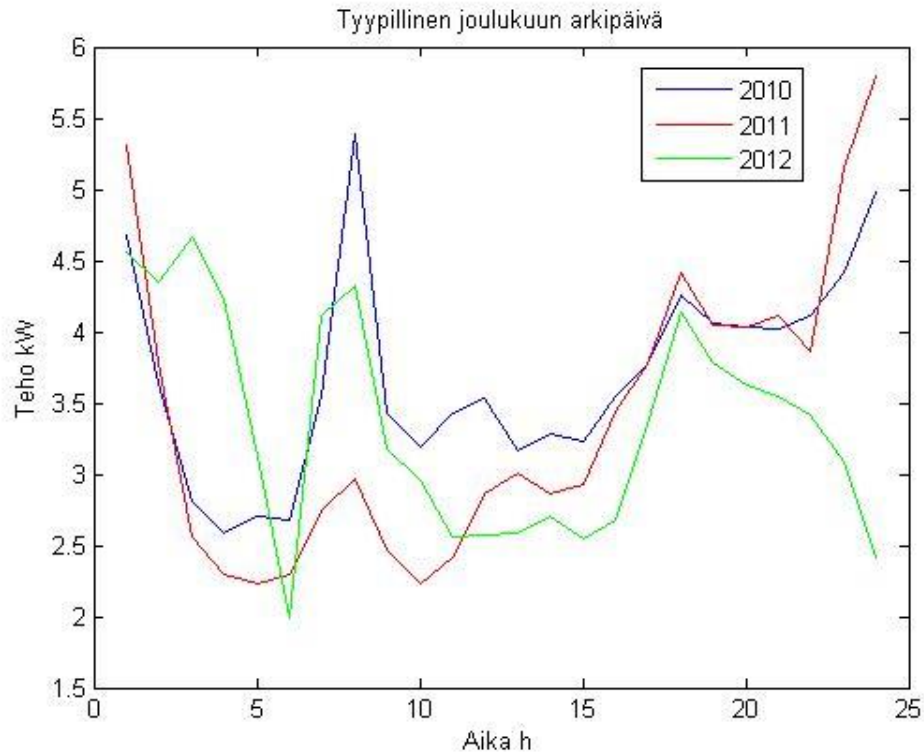




**Kuva 5.6** Kuormituskäyttäytyminen helmikuussa vuosina 2010–2013

Kuvista 5.5 ja 5.6 havaitaan, että kuormituksen vaihtelu on ollut melko suurta myös ohjaamattomien vuosien välillä. Tämä vaihtelu selittyy normaalilla vuosien välisellä hajonnalla. Lisäksi yksittäiselle asiakkaalle muodostettu yksilöllinen kuormituskäyrä on useamman samankaltaisen asiakkaan käyrää epätasaisempi.

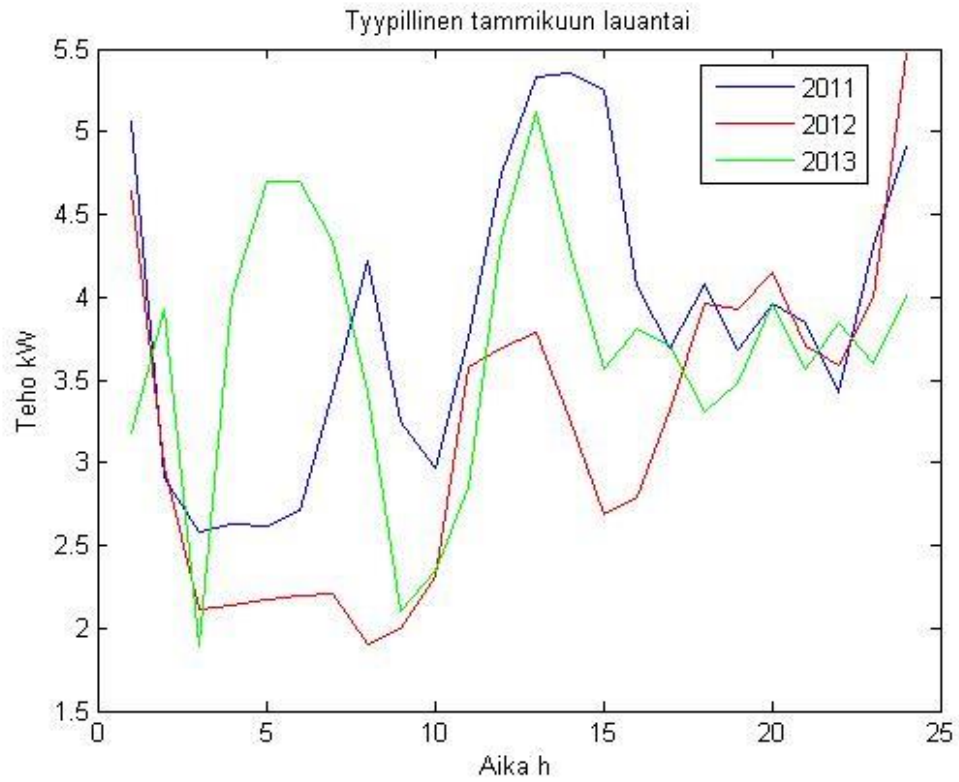
Kuvien 5.5 ja 5.6 perusteella voidaan todeta, että vuoden 2013 käyrä poikkeaa aiemmista vuosista selvästi. Etenkin kuormitushuippujen ajankohdat vaihtelevat verrattuna aiempiin vuosiin. Lisäksi vuoden 2013 käyrä on pääsääntöisesti muiden käyrien alapuolella, joten energian kulutus on ollut tasaisempaa ja vähäisempää. Liitteessä 1 on esitetty kuvia 5.5 ja 5.6 vastaavat käyrät tilanteelle, jossa ohjaamattomat vuodet on yhdistetty yhdeksi käyräksi, jolloin ero ohjatun ja ohjaamattoman vuoden välillä erottuu paremmin. Tarkempaa analyysia varten kuvissa 5.7–5.9 on esitetty kolmen eri päivätyypin (arkipäivä, lauantai ja sunnuntai) kuormituskäyrät. Joului-, tammi- ja helmikuun arkipäivät, lauantait ja sunnuntait ovat melko samanlaisia, joten tarkasteluun on otettu kuormituskäyrät, joista erot ohjaamattoman ja ohjatun tapauksen välillä näkyvät parhaiten.



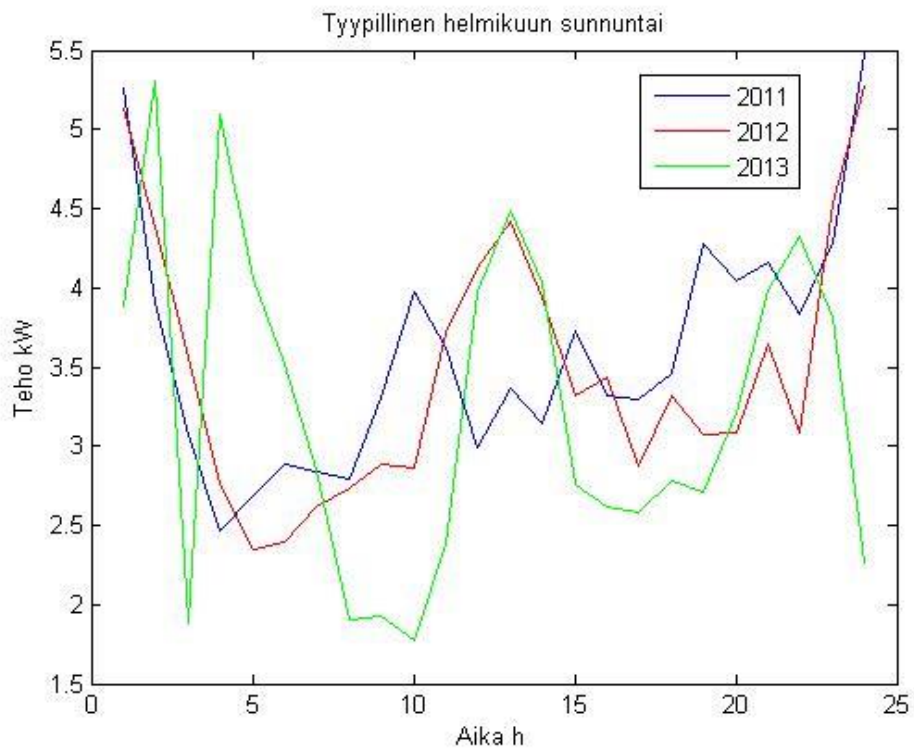
**Kuva 5.7** Tyypillinen joulukuun arkipäivä

Kuvassa 5.7 on esitetty tyypillinen joulukuun arkipäivä, mutta yhtä hyvin tarkastelun kohteeksi olisi voitu ottaa tammi- tai helmikuun arkipäivä. Ohjaustoimenpiteet näkyvät arkipäivän osalta lämminvesivaraajan toiminnan siirtymisenä muutamalla tunnilla eteenpäin. Ohjaamattomassa tilanteessa lämminvesivaraaja on mennyt päälle heti yösähkön alkaessa klo 22. Tämä näkyy kuvassa 5.7 kuormitushuippuna noin klo 22–02. Spot-ohjauksen seurauksena lämminvesivaraaja on kuitenkin kytkeytynyt päälle vasta noin klo 24 ja ollut toiminnassa seuraavat neljä tuntia. Muilta osin arkipäivän tapauksessa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia tehokaistan käyttöönoton jälkeen, sillä käyrämuodot mukailevat toisiaan lämminvesivaraajan toimintaa lukuun ottamatta. Erot aikaisempiin vuosiin selittyvät kuormituksen satunnaisvaihtelulla, sillä myös ohjaamattomien vuosien 2010 ja 2011 välillä on huomattavia eroja.

Kuvassa 5.8 on vastaavasti esitetty tyypillinen lauantai tammikuulta ja kuvassa 5.9 tyypillinen sunnuntai helmikuulta.



**Kuva 5.8** Tyypillinen tammikuun lauantai



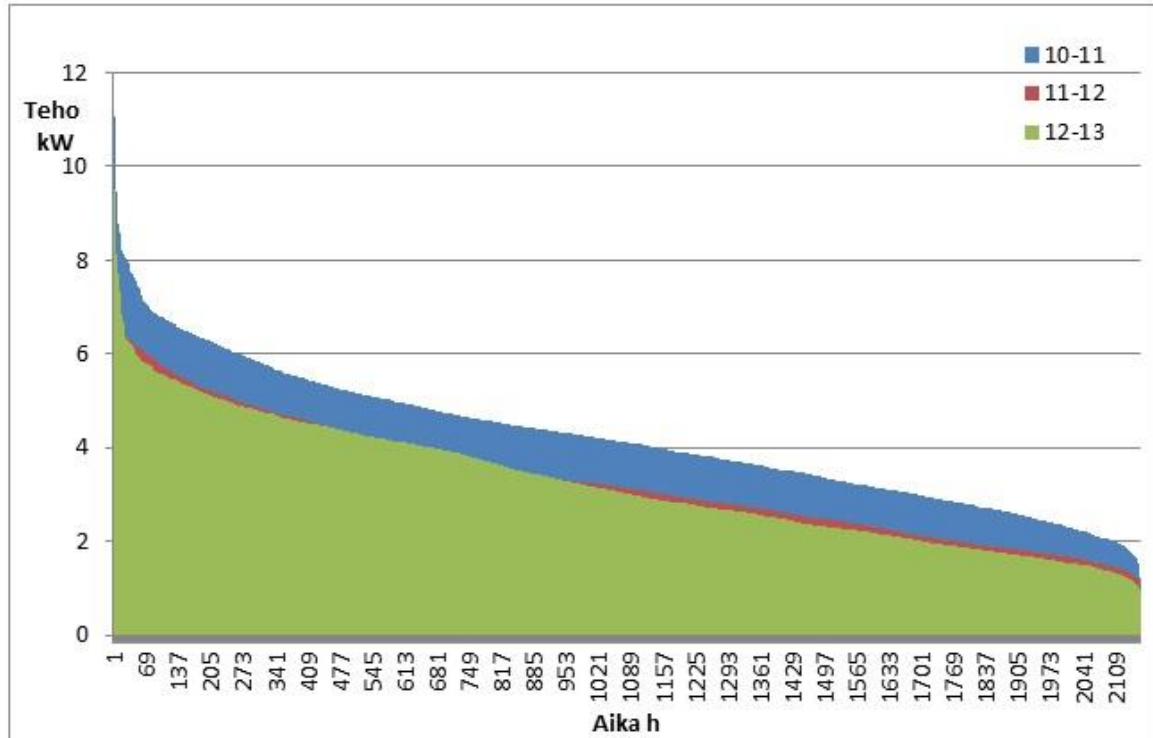
**Kuva 5.9** Tyypillinen helmikuun sunnuntai

Myös lauantain ja sunnuntain kuormituskäyrissä näkyy lämminvesivaraajan kytkeytyminen myöhemmäksi spot -ohjauksen seurauksena. Tehokaistan käyttöönnotosta kuvien 5.7–5.9 perusteella ei voida päätellä mitään, sillä kuormituksen vaihtelu voidaan perustella myös normaalilla vuosittaisella vaihtelulla ja yksilöllisen kuormituskäyrän epätarkkuudella. Käyrämuodot kuitenkin mukailevat toisiaan riittäväällä tarkkuudella myös kuvissa 5.8 ja 5.9. Mikäli tehokaista olisi ollut vakio koko tarkastelujakson (joulukuu-helmikuu) ajan ja ohjaustoimenpiteitä olisi ollut lähes jokaisena päivänä, tehokaistaohjaus olisi saattanut näkyä kuormituskäyrissä lämminvesivaraajan spot -ohjauksen lisäksi.

## 5.4 Kuorman ohjauksen vaikutus pysyvyyskäyriin

Kuorman ohjauksen vaikutuksia voidaan tarkastella myös pysyvyyskäyrien avulla. Pysyvyyskäyrillä pyritään havainnollistamaan kuormituksen pysyvyyttä tietyn ajanjaksona aikana. Tasainen pysyvyyskäyrä tarkoittaa, että kuormituksen ajallinen vaihtelu on ollut vähäistä. Lisäksi pysyvyyskäyrästä voidaan lukea, kuinka kauan kuormaa on käytetty tietyn tehon ylä- tai alapuolella.

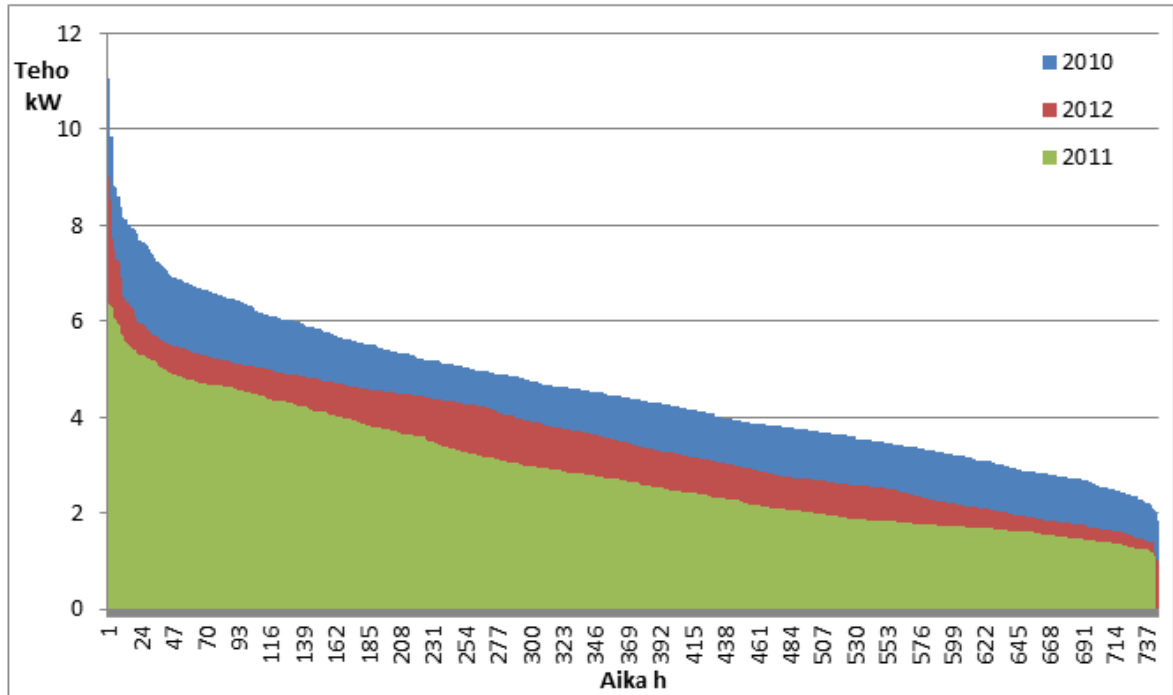
Kuvassa 5.10 on esitetty tarkasteltavan pilottiasiakkaan kuorman pysyvyyskäyrä ajalta joulukuu-helmikuu kolmena eri vuotena alkaen joulukuusta 2010. Pysyvyyskäyriä muodostettaessa ei ole huomioitu ulkolämpötilan vaikutusta asiakkaan kuormitukseen. Liitteessä 2 on esitetty lämpötilakorjatut pysyvyyskäyrät kuvia 5.10–5.12 vastaaville ajanjaksoille. Tarkempaan pysyvyyskäyrien analysointiin olisi tarvittu useamman kuin kolmen vuoden kulutustiedot, jolloin tarkasteltavana olisi ollut useampia samankaltaisia vuosia. Tässä tarkastelussa vuosien välillä on ollut merkittäviä eroja etenkin ulkolämpötilan suhteen, joten kuorman ohjauksesta aiheutuvat muutokset eivät ole nähtävillä yhtä selkeästi kuin laajempaa mittausdataa tarkasteltaessa.



**Kuva 5.10** Kuorman ohjauksen vaikutus pysyvyyskäyrään

Ulkolämpötilan vaihtelu eri vuosina näkyy sähkön kulutuksen (sähkölämmityksen tarpeen) merkittävänä erona vuosien 2010 ja 2011 välillä, sillä vuoden 2010 joulukuu sekä tammi- ja helmikuu vuonna 2011 olivat huomattavasti kylmempiä kuin vastaavat kuukaudet vuotta myöhemmin. Tästä erosta johtuen pysyvyyskäyrissä näkyy selvä pudotus alemmalle tasolle näiden kahden vuoden välillä. Vastaavaa eroa ei ole nähtävissä kuitenkaan vuosien 2011 ja 2012 välillä, sillä ulkolämpötila pidemmällä ajanjaksolla on ollut melko samanlainen. Joulukuu 2012 oli merkittävästi kylmempi kuin joulukuu 2011, mutta vastaavasti tammi- ja helmikuu olivat vuonna 2012 kylmempiä kuin vuonna 2013. Ero näiden kahden vuoden välillä selittyy kuorman ohjauksella. Kuorman ohjauksen myötä tehotasolla 5–6 kW näkyy pudotus verrattuna vuoden 2011 pysyvyyskäyrään, sillä ohjaustoimenpiteiden seurauksena yli 6 kW tehoa on siirretty alemman kulutuksen ajanhetkille. Lisäksi lievä kumpu vihreässä pysyvyyskäyrässä tuntien 400–900 välillä selittyy kuorman ohjauksella, sillä leikattu teho on palautettu verkkoon näille tunneille. Vastaavat erot pysyvyyskäyrissä ovat myös huomattavissa liitteessä 2 esitetyissä lämpötilakorjatuissa käyrissä.

Tehokaistan vaihtelun vuoksi pysyvyyskäyrässä ei näy suuria muutoksia pidemmällä tarkasteluvälillä, mutta kuukausitasolla pysyvyyskäyrissä näkyy huomattavia eroja. Kuvissa 5.11 ja 5.12 on esitetty joulu- ja helmikuun pysyvyyskäyrät kolmelta eri vuodelta.

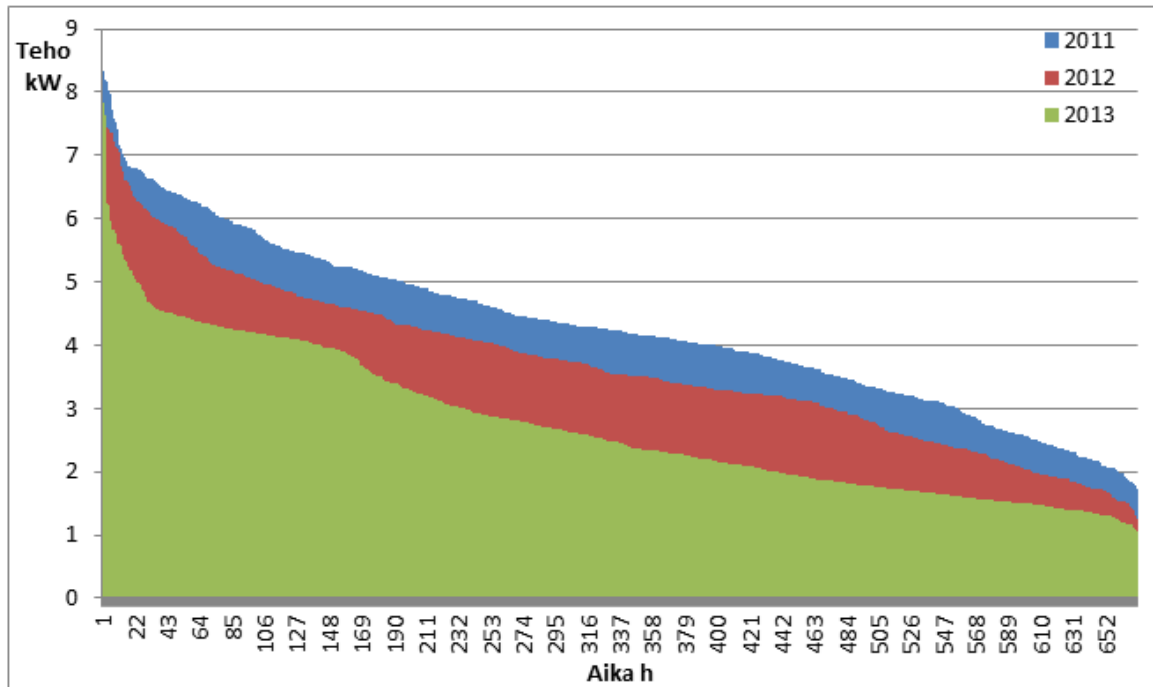


*Kuva 5.11 Joulukuun pysyvyyskäyrä*

Kuvassa 5.11 on esitetty joulukuun pysyvyyskäyrät vuosilta 2010–2012. Näistä käyristä vuoden 2012 joulukuussa tehokaista ja lämminvesivaraajan spot -ohjaus otettiin käyttöön. Tämä näkyy käyrämuodon selkeänä tasoittumisena verrattuna vuoteen 2011 sekä huipputehojen pienenemisenä vuoteen 2010 verrattuna. Joulukuu 2012 oli kuitenkin huomattavasti kylmempi kuin vuotta aiemmin, joten sähkölämmityksen määrä näkyy punaisen käyrän sijoittumisena vuosien 2010 ja 2011 väliin. Tehokaistan sijainti ei kuitenkaan ollut vakio joulukuussa 2012, vaan se vaihteli suuresti pilotoinnin seurauksena. Alimmillaan tehoraja oli 6,5 kW ja korkeimmillaan 12 kW hystereesirajan ollessa 1 kW, joten kuorman ohjaus oli hyvin satunnaista. Korkeimmalla tehorajalla ohjaustoimenpiteitä ei tapahtunut ollenkaan. Mikäli tehoraja olisi ollut koko kuukauden vakio, ohjaustoimenpiteet näkyisivät paremmin pysyvyyskäyrässä.

Kuvassa 5.12 on vastaavasti esitetty helmikuun pysyvyyskäyrät vuosilta 2011–2013. Pysyvyyskäyrien epätasaisesta muodosta voidaan päätellä, että sähkön kulutus on vaihdellut huomattavasti etenkin vuonna 2013. Sähkön kulutuksen vaihtelua voidaan selittää ulkolämpötilan vaihtelulla, joka helmikuussa voi olla huomattavaa yön ja päivän välillä. Etenkin helmikuun lopulla päivälämpötilaan vaikuttaa auringon säteilyn määrä yölämpötilan ollessa mahdollisesti hyvinkin alhainen. Vuosien 2011 ja 2012 helmikuussa sähkön kulutus on ollut melko tasaista verrattuna ohjattuun vuoteen 2013, mutta käyrämuodot ovat kuitenkin merkittävästi epätasaisempia kuin kuvan 5.10 vastaavat käyrät jouluihelmikuulta. Tämä epätasaisuus selittyy sillä, että pidemmällä ajanjaksolla kuormitus tasoittuu ja yksittäiset muutokset kuormassa eivät vaikuta käyrämuotoon yhtä merkittävästi.

Vuoden 2013 helmikuussa tehokaista on ollut lähes vakio, sillä tehoraja vaihteli helmikuun aikana välillä 6–7 kW. Vaihteluvälin tasoittuminen ja tehokaistan pysyminen lähes samassa kohdassa näkyy vuoden 2013 pysyvyyskäyrässä huipputehojen vähentymisenä. Verrattuna aikaisempiin vuosiin huipputehoa 7–8 kW on käytetty ainoastaan muutaman tunnin ajan. Vuoden 2013 käyrän epätasaisuus noin 160 tunnin kohdalla selittyy kuorman palauttamisella. Kuormaa on leikattu tehorajan perusteella ja se on palautettu takaisin kulutuksen alitettua 5–6 kW.



*Kuva 5.12 Helmikuun pysyvyyskäyrä*

Pysyvyyskäyrien kumpuilu voidaan selittää kuorman palauttamisen ajankohdalla. Tehokaistan periaatteena on palauttaa leikattu kuorma takaisin heti kulutuksen alitettua hystereesirajan. Ohjaus ei kuitenkaan huomioi mahdollisuutta palauttaa kuorma takaisin ajanhetkillä, jolloin kulutus on minimissään. Esimerkiksi tehorajan ollessa 6 kW ja hystereesirajan 1 kW tehokaista-algoritmi palauttaa kuorma takaisin heti kulutuksen alitettua 5 kW. Tähän ongelmaan voitaisiin vaikuttaa hystereesirajan nostamisella esimerkiksi 2 kW:iin, jolloin kuormaa palautettaisiin kulutuksen alitettua 4 kW. Tehokaistan leventämisessä tulee ongelmaksi kuitenkin asiakkaan asumismukavuus. Mikäli hystereesi on liian leveä, kuormien palauttaminen saattaa kestää useita tunteja.

## 5.5 Kokemuksia tehokaistapilotista

Edellä esitettyjen pysyvyy- ja kuormituskäyrien perusteella voidaan todeta tehokaista- ja spot -ohjauksen vaikuttaneen asiakkaan kuormituskäyttäytymiseen. Lämminvesivaraajan sähkön spot -hintaan perustuva ohjaus on siirtänyt varaajan toiminta-aikaa muutamalla tunnilla eteenpäin, kuten esimerkiksi kuvasta 5.7 voidaan huomata. Lisäksi tehokaistaohjaus näkyy pysyvyyssäilyssä huipputehojen vähentymisenä sekä kuorman palauttamisena, kuten kuvasta 5.12 huomataan.

Sähkötoimitusehtojen mukaan asiakkaalla, jolla on suora sähkölämmitys, yksittäinen lämmityselementti ei saa olla pois päältä yhtäjaksoisesti yli 1,5 tuntia eikä yhteensä yli 5 tuntia vuorokaudessa. Lisäksi jokaista jännitteetöntä ajanjaksoa tulee seurata jännitteellinen jakso, jonka tulee olla vähintään jännitteettömän ajan pituinen. (Energiateollisuus 2010) Tehokaista-algoritmissa ei huomioitu sähkötoimitusehtoja, mutta tehokaistaohjauksen kaupallistumisen kannalta ehtojen toteutuminen olisi tärkeää. Oikein toimiessaan keskimääräiset yhtäjaksoiset jännitteettömät ajat olivat kymmenestä minuutista puoleen tuntiin, mikä täyttää toimitusehdot. Kuormat saatettiin kuitenkin kytkeä uudelleen pois muutama minuutti takaisin kytkemisen jälkeen, mikä ei ole toimitusehtojen mukaista. Mikäli kuorma on ollut jännitteettömänä puoli tuntia, tulisi sen olla toiminnassa seuraavan puolen tunnin ajan. Tämä ongelma esiintyi etenkin osakuormalla, joka kytkettiin ensimmäisenä pois ja viimeisenä takaisin, mutta myös muilla osakuormilla esiintyi vastaavanlaista käyttäytymistä. Vähiten toimitusehtoja rikkovaa toimintaa oli osakuormalla, joka kytkettiin viimeisenä pois ja ensimmäisenä päälle. Kuitenkaan vuorokauden raja-arvoa ei ylitetty tehokaistan normaalin toiminnan aikana, vaan jokaisen osakuorman jännitteetön aika alitti viisi tuntia.

Tehokaistan toiminnassa esiintyi joitain pilotoinnille ominaisia ongelmia, jotka vaikuttivat katkaisijoiden toimintaan. Tämän tutkimuksen kannalta näillä ongelmilla ei kuitenkaan ollut merkitystä. Tehokaistan toimiessa halutulla tavalla katkaisijoiden suhteen muussa toiminnassa esiintyi viivettä. Osakuormien pitäisi palautua järjestyksessä kulutuksen alennuttua hystereesirajan verran. Kuormat kuitenkin välillä palautuvat pienellä viiveellä (muutaman minuutin luokkaa), kuten kuvasta 5.3 voidaan havaita. Tällä ongelmalla ei ole vaikutusta kuorman ohjauksen näkymiseen kuormituskäyrissä, mutta tehokaista-algoritmin kannalta tässä on kehitettävää.

Tehokaistan testauksen aikana ilmaantuneiden ongelmien ratkaisemisen lisäksi tehokaistapilotista voitaisiin kehittää joitain osin. Tällä hetkellä käyttöliittymän kautta ei saada tietoa leikattavan kuorman suuruudesta, vaan leikatun osakuorman suuruus pitää arvioida tehomittauksen ja katkaisijan toiminnan avulla. Tämä menetelmä ei kuitenkaan toimi tapauksessa, jossa kuorman leikkausta edeltävän minuutin ja minuutin, jolta kuorma on leikattu, tehot ovat lähes samat.



## 6 AURINKOPANEELIEN VAIKUTUS KUORMITUKSEEN

Aivan kuten kuorman ohjauksen tapauksessa myös aurinkopaneelien tuotanto vaikuttaa asiakkaan mitattuun kokonaiskuormitukseen. Aurinkopaneelien tapauksessa muutoksen ajankohtaan tosin ei voida vaikuttaa ilman sähkövarastoa, joten huippukuormitukseen ei voida suoraan vaikuttaa. Lisäksi paneelit tuottavat eniten energiaa kesäaikaan, jolloin sähkön kulutus on Suomessa pienimmillään.

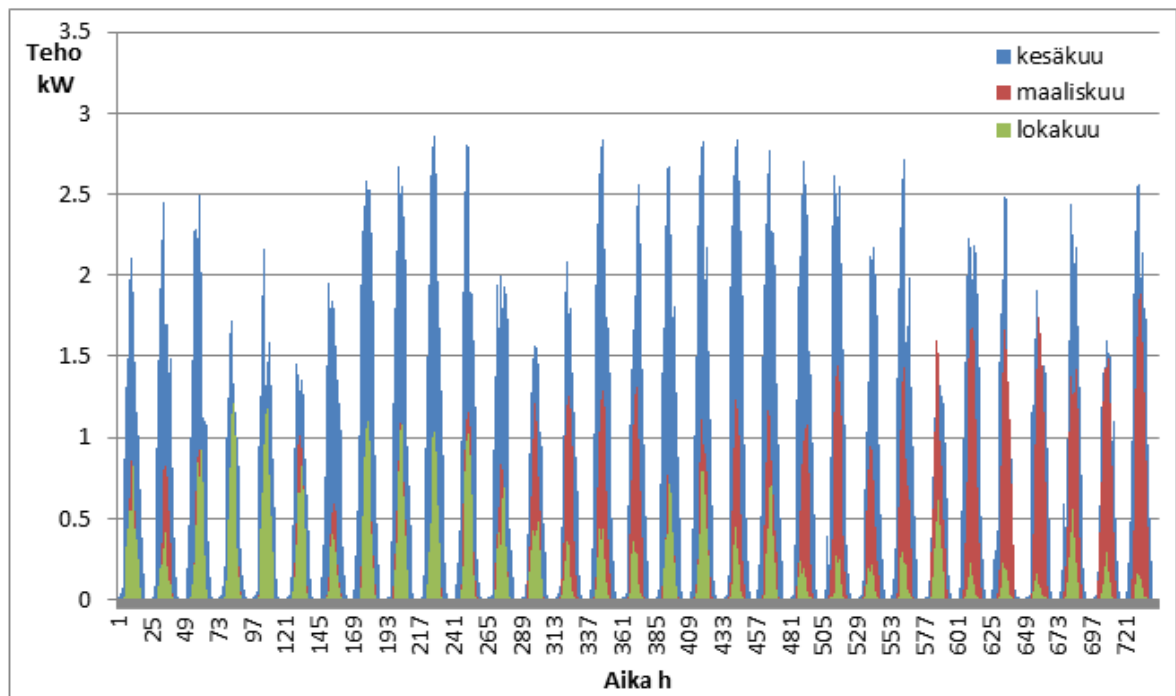
Tämän luvun teoreettisessa tarkastelussa on käytetty aurinkopaneeliyksikköä, joka pinta-ala on  $20 \text{ m}^2$  ja sähkön tuotannon hyötysuhde 0,17. Tällaisten paneelien nimellisteho on noin 3 kW. Paneelien alaksi valittiin  $20 \text{ m}^2$ , koska tämän kokoluokan paneeleilla tuotannon vaikutus asiakkaan kuormitukseen on huomattavissa kesän lisäksi myös kevät- ja syysaikaan. Kesäaikaan jo  $10 \text{ m}^2$  paneeleilla oma tuotanto vaikutti merkittävästi mitattuun kuormitukseen, mutta kevät- ja syyskuukausien aikana tuotanto oli melko huomaamatonta. Lisäksi tässä luvussa tarkastellaan teoreettista tilannetta, jossa aurinkopaneelien rinnalle on kytketty sähkövarasto.

### 6.1 Paneelien tuottama energia

Aurinkopaneelien tuotanto riippuu voimakkaasti sekä vuodenajasta että vuorokauden ajasta. Kesäaikaan paneelit tuottavat sähköä lähes koko päivän ajan päivän ollessa pisimmillään. Parhaimmassa tapauksessa paneelit voivat tuottaa jopa 20 tuntia päivässä. Talviaikaan puolestaan tuotanto on hyvin vähäistä päivän pituuden ollessa vain muutamien tuntien luokkaa. (SoDa 2013) Lisäksi talviaikaan aurinko paistaa hyvin matalalta, jolloin suurin osa säteilystä ei osu paneeleihin ilman kallistuskulman muutoksia. Talvisin tulee myös huolehtia paneelien puhtaudesta lumen vuoksi. Keväisin ja syksyisin aurinkopaneelien tuotantoon vaikuttaa voimakkaasti päivän pituus. Keväällä paneelien tuotto lisääntyy päivän pidentessä ja syksyllä vastaavasti vähenee päivän lyhentyessä. Lisäksi paneelien tuotantoon vaikuttaa näinä vuodenaikoina lumen määrä, sillä lumi heijastaa auringon säteilyä paneeleihin lisäten tuotantoa. Etenkin keväthankien vaikutus paneeleihin osuvaan säteilyyn aurinkoisena päivänä on huomattava.

Kuvassa 6.1 on havainnollistettu vuodenajan vaikutusta aurinkopaneelien tuotantoon Tampereella. Säteilytiedot paneelien tuotannon arvioimiseksi on otettu internet-portaalista,

joka mallintaa auringon säteilyä kaikkialta maailmasta (SoDa 2013). Pohjois-Suomessa ero eri vuodenaikojen välillä on vielä merkittävämpi päivän pituuden suuren vaihtelun vuoksi. Kuvasta 6.1 huomataan sekä vuodenaajan että vuorokauden ajan vaikutus paneelien tuotantoon. Päiväaikaan tuotannossa näkyy selkeä tehopiikki yöajan tuotannon ollessa nolla. Vuodenaajan vaikutus näkyy tuotantokuippujen korkeudessa. Kesäkuussa (sininen käyrä) huipputehojen vaihtelu ei ole ihan yhtä merkittävää kuin maaliskuussa ja lokakuussa. Osa huipputehojen vaihtelusta päivittäin selittyy pilvisyydellä, mutta maaliskuussa ja lokakuussa on huomioitava myös päivän pidentyminen/lyhentyminen. Maaliskuussa (punainen käyrä) paneelit alkavat tuottaa selkeästi enemmän energiaa kuukauden puolen välin jälkeen, sillä säteilyn määrä lisääntyy merkittävästi. Vastaavasti lokakuussa (vihreä käyrä) tuotanto pienenee merkittävästi loppukuuta kohti päivän lyhenemisen seurauksena.

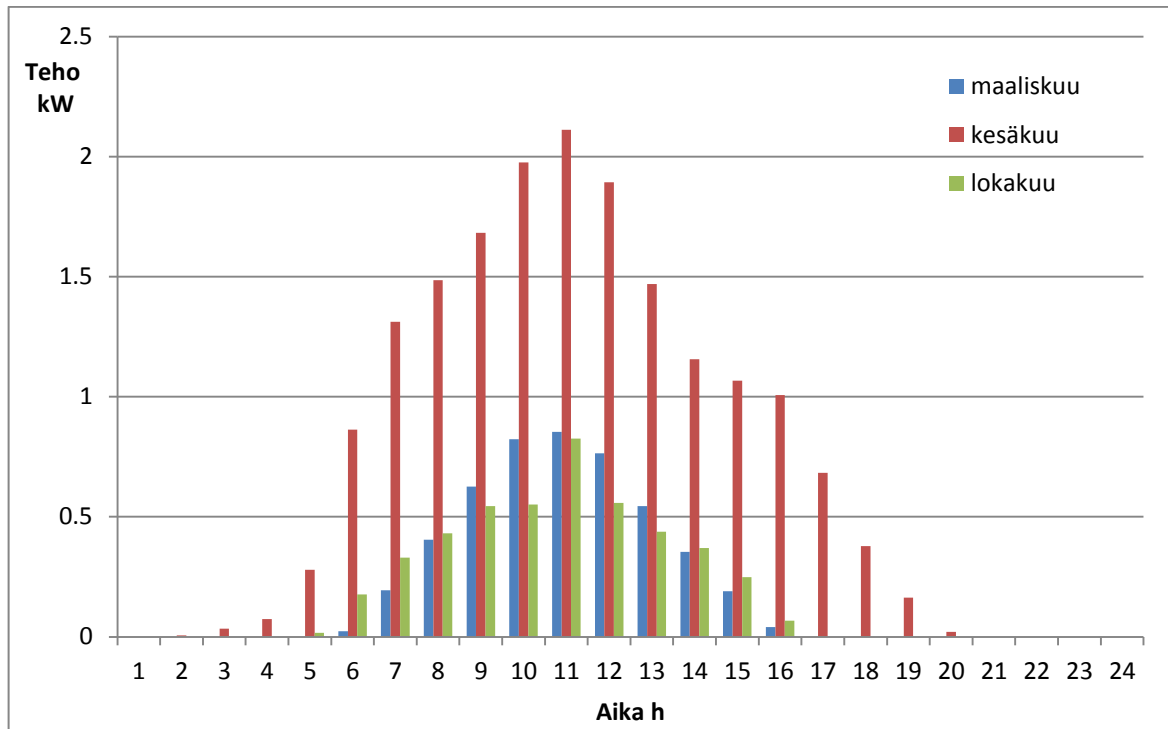


**Kuva 6.1.** Vuodenaajan vaikutus aurinkopaneelien tuotantoon

Verrattaessa eri kuukausina tuotettua kokonaisenergiaa huomataan, että kesäkuussa paneelit ovat tuottaneet enemmän kuin maaliskuussa ja lokakuussa yhteensä. Kesäkuussa kyseiset paneelit ovat tuottaneet noin 650 kWh, maaliskuussa 230 kWh ja lokakuussa 95 kWh.

Tarkasteltaessa yksittäistä päivää erot paneelien tuotannossa näkyvät kuukausitarkastelua selkeämmin. Kuvassa 6.2 on esitetty yhden päivän tuotanto eri kuukausina. Kuvasta 6.2 on nähtävissä selkeä ero päivän pituudessa sekä säteilyn määrässä verrattaessa kesäkuuta maaliskuussa ja lokakuuhun. Yksittäisen päivän kohdalla ero maaliskuussa ja lokakuun välillä ei tule esille yhtä selkeästi kuin kuvasta 6.1, sillä yhden päivän arvot

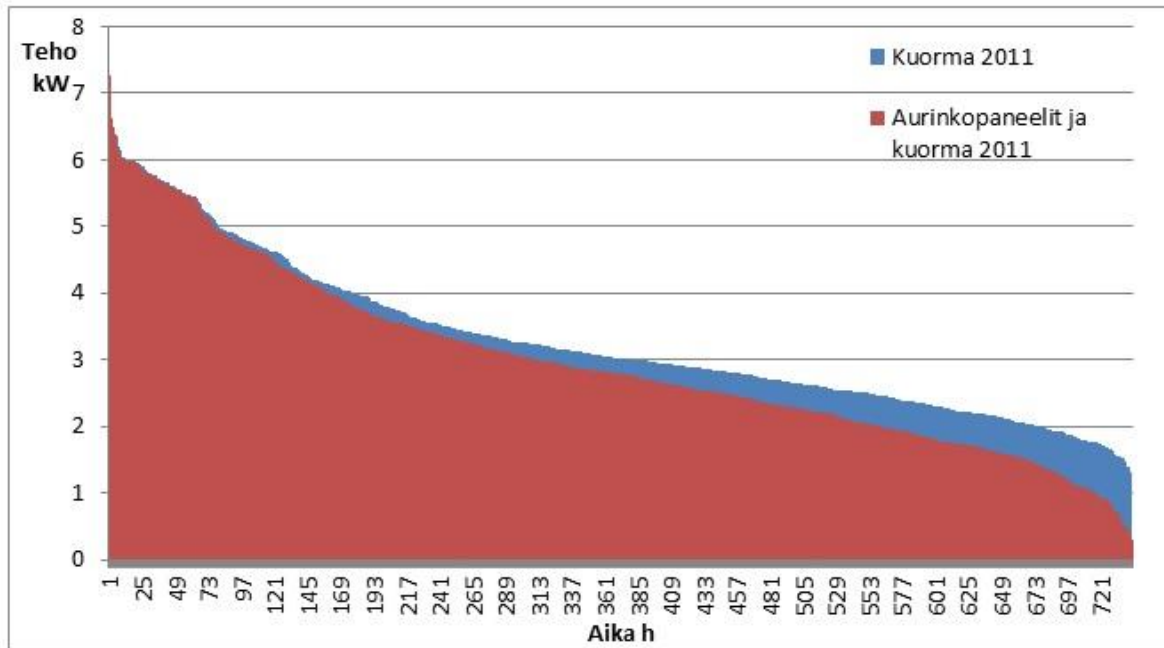
vaihtelevat kuukausiarvoja enemmän esimerkiksi pilvisyyden seurauksena. Kuvan 6.2 punaisen käyrän äkillinen pudotus iltapäivällä selittyy osittaisella pilvisyydellä, sillä auringon paistaessa pilvettömältä taivaalta paneelien tuotantokäyrä mukailee Gaussin käyrää.



*Kuva 6.2 Aurinkopaneelien tuotanto yhtenä päivänä eri kuukausina*

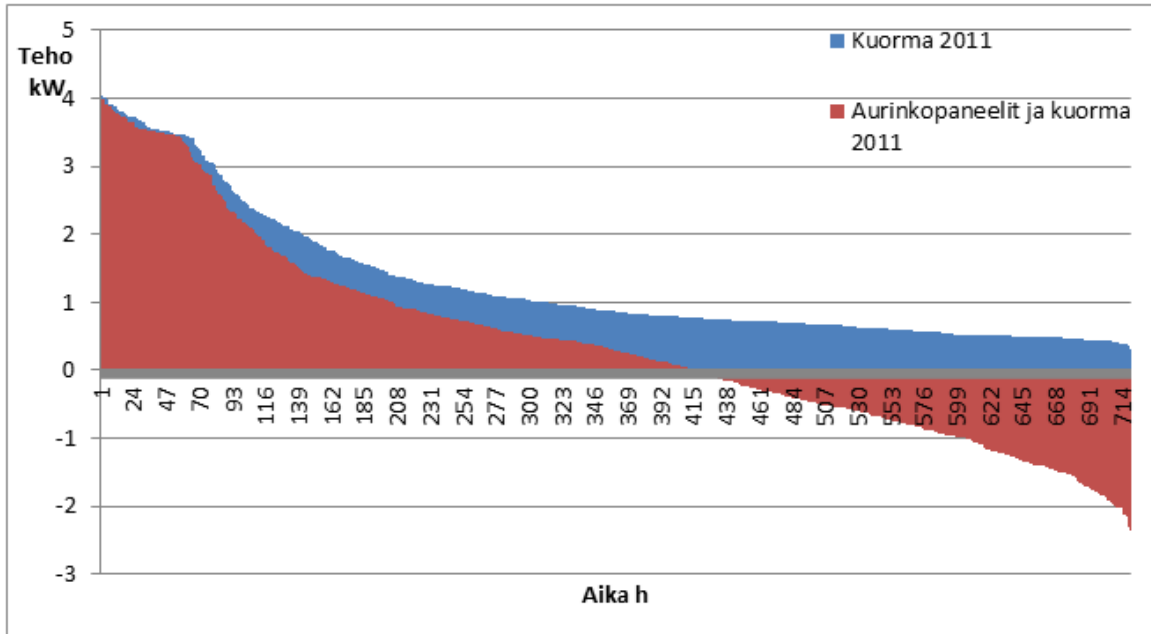
## 6.2 Tuotannon vaikutus kuormitukseen

Kuorman ohjauksen tapauksessa eri vuosien pysyvyyskäyriä verrattiin suoraan toisiinsa. Aurinkopaneelien tapauksessa normaalia kuormitusta verrataan oman tuotannon ja kuormituksen yhdistelmään, jolloin saadaan arvio siitä, miten paneelit vaikuttaisivat kokonaiskuormaan. Peruskuormana on käytetty pilottiasiakkaan kuormitusta ennen tehokaistan käyttöönottoa, ja tähän kuormitukseen on lisätty aurinkopaneelien vaikutus. Kuvissa 6.3–6.5 on esitetty eri kuukausien pysyvyyskäyrät pelkällä kuormalla sekä kuorman ja tuotannon yhdistelmällä. Talvikuukausia ei ole tarkasteltu, sillä aurinkopaneelien tuotanto on tuona aikana varsin vähäistä ja suurimpana osana päivistä tuotantoa ei ole lainkaan. Kuvissa 6.3–6.5 sinisellä värillä on kuvattu kuorman pysyvyyttä ilman tuotantoa ja punaisella tuotannon kanssa.



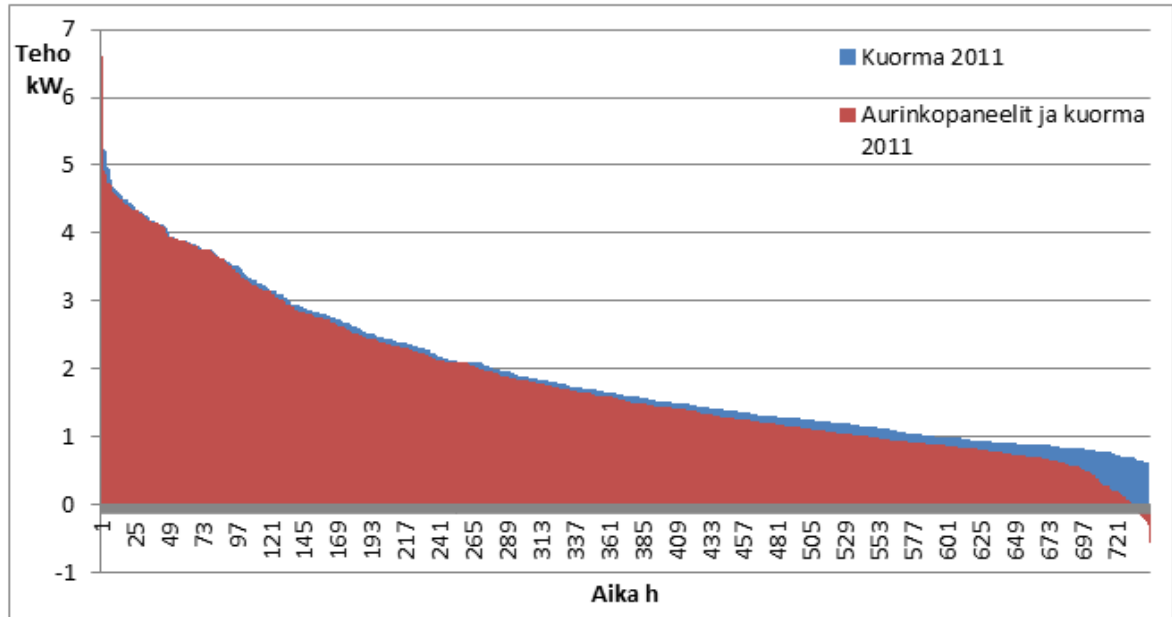
**Kuva 6.3** Maaliskuun pysyvyyskäyrät

Kuvasta 6.3 havaitaan, että pinta-alaltaan 20 m<sup>2</sup> aurinkopaneeleilla voidaan vaikuttaa asiakkaan kuormitukseen merkittävästi maaliskuussa etenkin matalalla tehotasolla, mutta paneelit eivät syötä sähköä verkkoon. Maaliskuussa paneelilta vaadittaisiin pinta-alaa noin 30 m<sup>2</sup>, jotta ne hetkittäisesti tuottaisivat enemmän sähköä kuin asiakas kuluttaa. Lisäksi kuvasta 6.3 voidaan todeta, että paneelien olemassaolo on pudottanut pysyvyyskäyrää alemmalle tehotasolle. Esimerkiksi pelkän kuorman tapauksessa yli 3 kW:n mitattua kokonaiskuormitusta on ollut noin 390 tuntia, mutta paneelien asentamisen jälkeen noin 300 tuntia. Maaliskuussa paneelien tuotantoon vaikuttaa suoran auringon säteilyn lisäksi myös lumesta heijastuva säteily, jolloin tuotantoa saattaa olla enemmän kuin mallinnettu säteily antaisi ymmärtää, sillä mallinnettaessa tätä hajasäteilyä ei huomioida. Myös päivän pituuden nopea muuttuminen vaikuttaa paneelien tuotantoon.



**Kuva 6.4** Kesäkuun pysyvyyskäyrät

Kuvassa 6.4 on esitetty kesäkuun pysyvyyskäyrä. Kuvasta 6.4 huomataan, että aurinkopaneelit vaikuttavat merkittävästi asiakkaan kuormitukseen kesäkuussa. Huipputehoon paneeleilla ei voida vaikuttaa tuotannon satunnaisuuden vuoksi, mutta kesäaikaan paneelien vaikutus on merkittävä alemmilla tehotasoilla. Kesäkuussa paneelit ovat syöttäneet verkkoon noin 40 % ajasta, ja parhaimmillaan tehoa on syötetty muutaman tunnin ajan yli 2 kW. Tällainen tehon syöttö on mahdollista aurinkoisena kesäpäivänä auringon ollessa korkea taivaalla ja paistaessa pilvettömältä taivaalta. Mikäli aurinkopaneelien lisäksi asiakkaalla olisi käytössä sähkövarasto, suurin osa kulutuksesta voitaisiin kattaa paneelien tuottamalla sähköllä. Tätä tilannetta tarkastellaan luvussa 6.3.



**Kuva 6.5** Lokakuun pysyvyyskäyrät

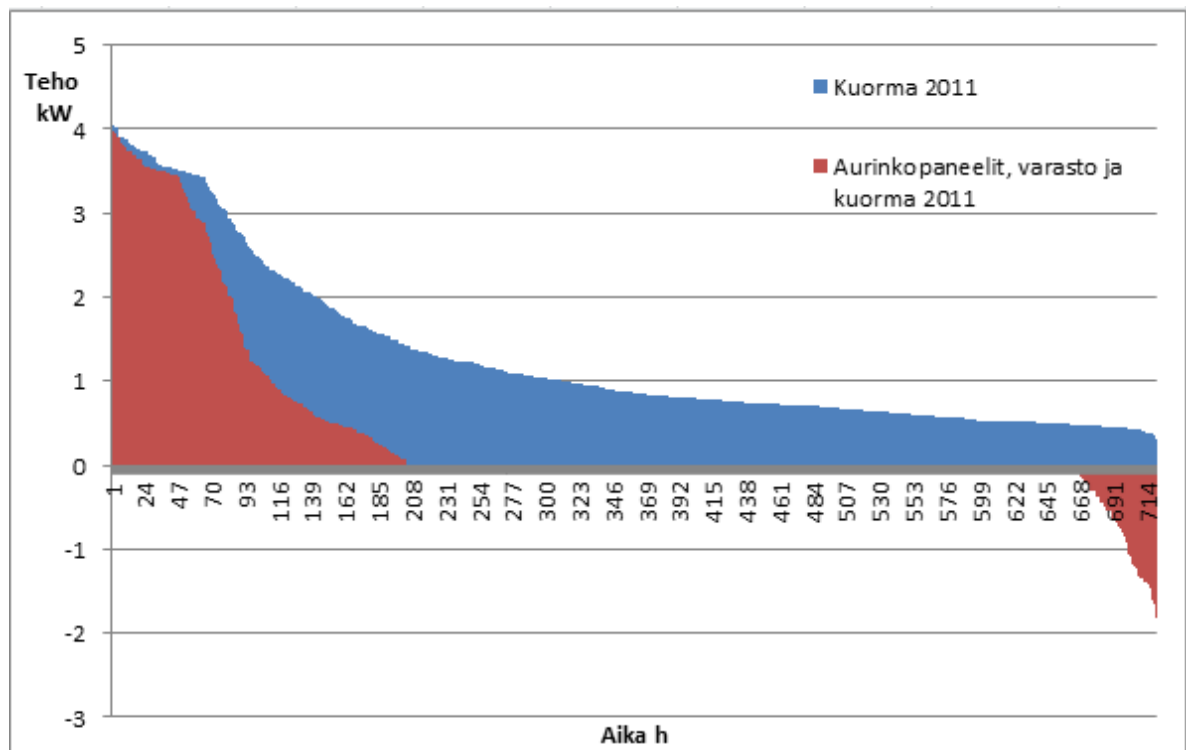
Kuvassa 6.5 on esitetty aurinkopaneelien vaikutus lokakuun pysyvyyskäyrään. Paneelien tuotanto lokakuussa on melko vähäistä etenkin lokakuun lopussa päivän lyhenemisen vuoksi. Lisäksi Suomen oloissa lokakuussa on melko pilvistä, joten auringon säteily jää vähäiseksi. Aurinkoisina päivinä paneelit kuitenkin tuottavat jonkin verran, ja tällä tuotannolla voidaan vaikuttaa matalan tason tehoihin. Kuten kuvan 6.5 pysyvyyskäyrästä voidaan havaita, paneelien asentamisen seurauksena alle 2 kW:n tehot ovat vähentyneet hieman. Merkittävämpi vaikutus näkyy alle 1 kW:n tehoissa. Lisäksi paneelit ovat tuottaneet muutaman tunnin ajan enemmän energiaa kuin asiakas on kuluttanut. Lokakuussa paneeleita vaadittaisiin vähintään 25 m<sup>2</sup>, jotta ne syöttäisivät verkkoon päin useamman tunnin ajan.

Jokaisesta edellä esitetystä pysyvyyskäyrästä voidaan huomata, että aurinkopaneelilla ei pystytä juurikaan vaikuttamaan kohteen huippukuormitukseen. Tämä johtuu tarkasteltavan kohteen kuormitushuippujen sijoittumisesta yöaikaan, jolloin paneelit eivät tuota sähköä. Pysyvyyskäyrästä voidaan kuitenkin havaita, että paneelien asentamisen seurauksena käyrämuodot ovat tasoittuneet. Lisäksi kesä- ja lokakuussa paneelit ovat hetkittäin jopa syöttäneet tehoa verkkoon, mikä näkyy kuvaajissa negatiivisena tehona. Etenkin kesäkuussa paneelien tuottamalla sähköllä voitaisiin kattaa suuri osa asiakkaan kokonaiskulutuksesta. Myös heinä- ja elokuussa saataisiin samankaltaisia tuloksia kuin kesäkuussa. Sähkövaraston avulla asiakas voisi hyödyntää myös kuvissa 6.4 ja 6.5 näkyvän negatiivisen tehon. Kesäaikaan sähkövaraston avulla asiakas voisi kattaa suurimman osan energian kulutuksestaan paneelien tuottamalla sähköllä.

### 6.3 Aurinkopaneelit ja sähkövarasto

Aurinkopaneelien tuotannon sijoittuminen keskipäivään ei ole sähkön käyttäjän kannalta paras mahdollinen tilanne, sillä keskipäivällä kulutus on pienimmillään, etenkin arkisin. Tämä havaitaan esimerkiksi kuvasta 6.4, sillä negatiivista kuormaa on merkittävästi. Lisäksi tyypillisellä sähkölämmitteisellä asiakkaalla sähkön kulutushuiput sijoittuvat iltaan sekä yöhön. Sähkövaraston avulla kuluttaja voisi hyödyntää suurimman osan, ellei jopa kaiken, tuottamastaan energiasta itse, jolloin ostetun sähkön määrä vähenisi entisestään, etenkin kesäaikaan. Tämän luvun tarkastelussa luvun 6.2 aurinkopaneelien rinnalle on kytketty varastoimiskapasiteetiltaan 10 kWh:n akusto.

Kuvassa 6.6 on esitetty asiakkaan kesäkuun pysyvyyskäyrä tilanteessa, jossa kuormitukseen vaikuttavat sekä aurinkopaneelit että sähkövarasto.

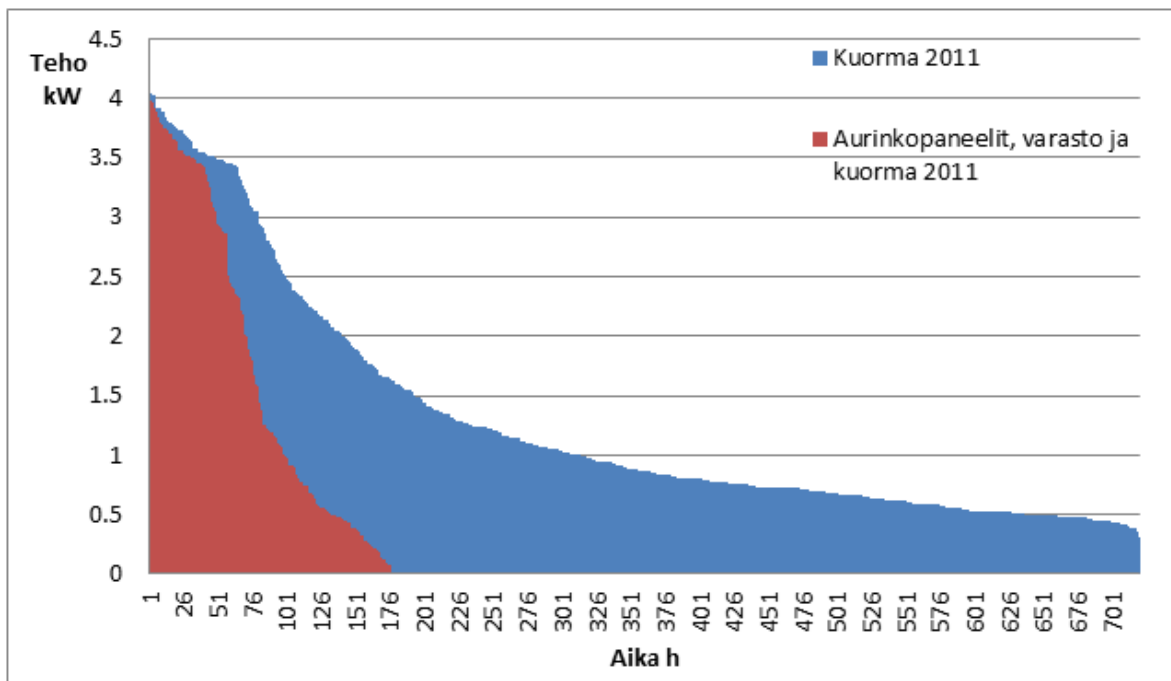


**Kuva 6.6** Aurinkopaneelien ja 10 kWh sähkövaraston vaikutus pysyvyyskäyrään

Kuvasta 6.6 huomataan, että sähkövaraston lisääminen vähentää merkittävästi ostetun sähkön määrää sekä verkkoon päin syötettyä energiaa verrattuna kuvan 6.4 varastottomaan tilanteeseen. Ilman sähkövarastoa verkkoon syötetyn energian määrä oli 273 kWh, mutta varaston kanssa se on enää 44 kWh. Lisäksi sähkövaraston lisäämisen seurauksena kohteen mitattu kulutus oli nollassa 462 tuntia eli yli puolet koko kesäkuusta. Kesäkuun lisäksi myös heinäkuussa sekä mahdollisesti touko- ja elokuussa paneeleilla voitaisiin tuottaa suurin osa asiakkaan tarvitsemasta sähköstä.

Sähkövaraston olemassaolo vaikuttaa myös huipputehojen määrään jonkin verran verrattuna kuvan 6.4 tilanteeseen. Varaston avulla myös illan kuormitukseen pystytään vaikuttamaan. Suurimpien tehojen (yli 3,5 kW) määrää varaston lisäämisellä ei kuitenkaan pystytä vähentämään tämän kokoisella akulla, sillä kuormitushuiput ajoittuvat yöaikaan. Ilta- ja yöaikaan paneelit eivät tuota, jolloin varastosta puretaan energiaa kulutuksen mukaan. Varaston kapasiteetti ei riitä kattamaan kaikkea yön aikana kulutettua sähköä.

Kuvassa 6.7 on puolestaan esitetty tilanne, jossa sähkövaraston kapasiteetti riittää varastoimaan kaiken paneelien tuottaman ylimääräisen energian. Tällaisen akun varastointikapasiteetti on 19 kWh. Kuvasta 6.7 huomataan, että paneelien ja varaston avulla pystytään kattamaan kesäkuun kulutuksesta noin 75 %:a. Verrattuna kuvan 6.6 pysyvyyskäyrään suuremmalla akulla huipputehojen sekä matalan tason tehojen määrää saadaan leikattua entisestään.

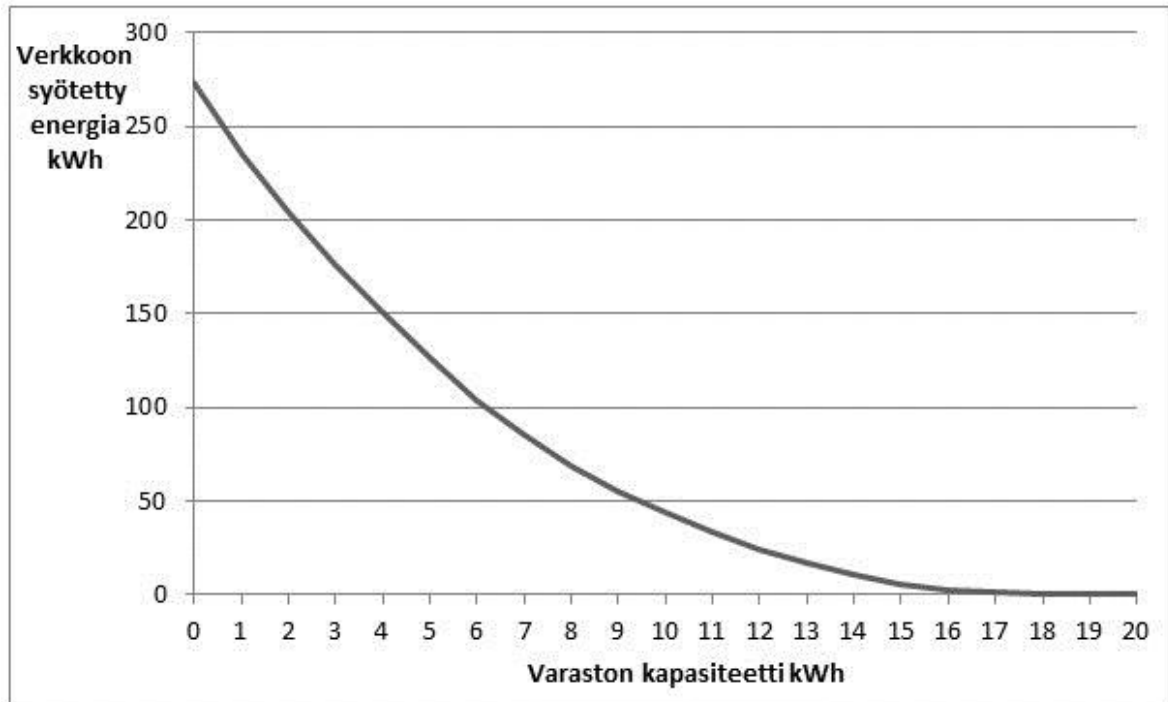


**Kuva 6.7** Paneelien ja 19 kWh akuston vaikutus kesäkuun pysyvyyskäyrään

Tarkasteltaessa verkkoon syötetyn energian ja akkukapasiteetin suhdetta voidaan tehdä arvio optimaalisesta varastokoosta. Tarvittavan varastokapasiteetin valinta tulee tehdä kesän perusteella, sillä aurinkopaneelien tuotanto on tällöin huipussaan. Kuvassa 6.8 on esitetty akun varastoimiskapasiteetin suhde verkkoon syötettyyn energiaan. Kuvasta 6.8 havaitaan, että verkkoon syötetyn energian määrän väheneminen hidastuu varastokoon ollessa noin 8 kWh:a. Tähän kokoon asti syötetyn energian määrän väheneminen on ollut lähes lineaarista. Lisäksi kuvasta huomataan, että varaston kapasiteetin kasvattaminen 15 kWh:sta ylöspäin ei vaikuta enää merkittävästi syötetyn energian määrään. Kuvasta 6.8



voidaan päätellä, että tarkasteltavalla kohteella sähkövaraston optimaalinen koko olisi noin 9–11 kWh, sillä tätä pienemmillä kapasiteeteilla verkkoon syötetyn energian määrä on melko suurta ja suuremmilla ei saada merkittävää hyötyä kapasiteetin kasvattamisesta.



**Kuva 6.8** Varaston kapasiteetin suhde verkkoon syötettyyn tehoon

## 7 KUORMITUSTEN MALLINTAMISEN KEHITTÄMISMAHDOLLISUUDET

Kuormitusten mallintamisen kannalta kuorman ohjaus ja oman tuotannon mahdollisuus tuovat uusia haasteita kuormitusennusteiden luomiseen. Vanhat mallit eivät enää aina ennusta asiakkaiden kulutusta luotettavasti, kuten luvun 5.3 perusteella voidaan todeta. Kuormituksen muuttumisen seurauksena myös malleja on muutettava kuorman vaikuttavien tekijöiden lisääntyessä.

Mallien luotettavuuden lisäksi oman tuotannon ja kuorman ohjauksen yleistymisen yksittäisillä asiakkailla kyseenalaistaa myös nykyisen AMR -mittauksen riittävyyden. Tämän hetkisinä laitteilla mitataan ainoastaan kohteen kokonaiskulutusta, joka voi sisältää esimerkiksi omaa tuotantoa, kuorman ohjausta tai näitä molempia. Lisäksi yksittäisillä asiakkailla on tulevaisuudessa sähköautoja, joiden lataus vaikuttaa kuormitusmallien luotettavuuteen ja sähkön kokonaiskulutukseen. Tulevaisuudessa AMR -mittarin rinnalla saattaa olla lisämittareita, jotka mittaavat esimerkiksi oman tuotannon suuruutta tai kuorman ohjauksen tapauksessa ohjattavan kuorman suuruutta.

### 7.1 Kuorman ohjauksen mallintaminen

Kuorman ohjauksen huomioiminen kuormitusmalleissa ei ole yksiselitteistä, sillä kyseessä voi olla suora kuorman ohjaus tai kysynnän hintajoustosta aiheutuva ohjaus. Työssä tarkastellun pilot -kohteen tapauksessa tehokaistaan perustuvaa kuorman ohjausta voitaisiin lähteä mallintamaan teho- ja hystereesirajojen avulla. Toisaalta tämä vaatisi tarkastelujakson lyhentämistä minuuttiin, sillä tehokaista-algoritmi toimii minuuttitasolla. Kuormitusennusteita rakennettaessa tarkastelujakson lyhentäminen ei kuitenkaan ole mielekäästä, sillä verkon kuormituksen kannalta kiinnostavampaa on tuntitehojen vaihtelu ja tunneittaiset huipputehot.

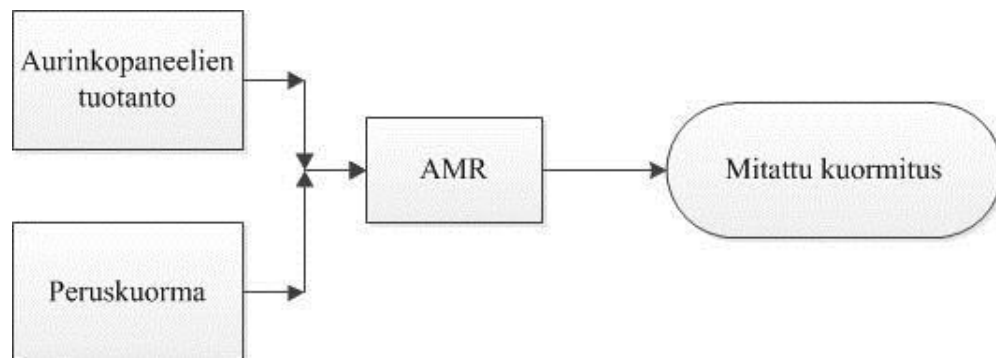
Tulevaisuudessa tehokaista ei kuitenkaan välttämättä ole ainoa mahdollinen kuorman ohjauksen toteutustapa, joten sen pohjalle ei yleistä mallia voida rakentaa. Yleisessä tapauksessa yksi vaihtoehto voisi olla uusien klustereiden lisääminen vanhoihin mallinnusmenetelmiin. Asiakkaille, joilla on käytössä suora kuorman ohjaus tai kysynnän hintajousto, luotaisiin oma klusteri. Tapauksessa, jossa kuluttajalla on käytössään

molemmat kysynnän jouston toteutustavat olisi lisäksi oma luokkansa. Näin pystyttäisiin luomaan omat kuormitusmallit tällaisille kuluttajille ja kuormien ennustaminen helpottuisi. Uusia klustereita luotaessa tulisi prosessi kuitenkin alustaa, jotta ohjauksen piirissä olevat asiakkaat sijoittuisivat oikein. Nykyisillä malleilla etenkin spot -ohjauksen piirissä olevat sähkölämmitteiset kuormat käyttäytyvät odottamattomasti verrattuna ohjaamattomaan tilanteeseen, kuten kuvista 5.7–5.9 voidaan todeta.

Spot -ohjattavien kuormien tapauksessa toinen mahdollinen ratkaisu klustereiden lisäksi voisi olla sähkön hinnan vaihteluiden lisääminen kuormitusmalleihin lämpötilariippuvuuskerroimien lisäksi. Spot -hinnoista saataisiin halvimman sähkön ajankohdat, jolloin ohjattavat kuormat todennäköisimmin kytkeytyisivät päälle. Sähkön spot -hintaa kuitenkin vaihtelee päivittäin, joten pidemmän jakson ennusteita ei tällä menetelmällä voitaisi tehdä.

## 7.2 Aurinkopaneelien mallintaminen

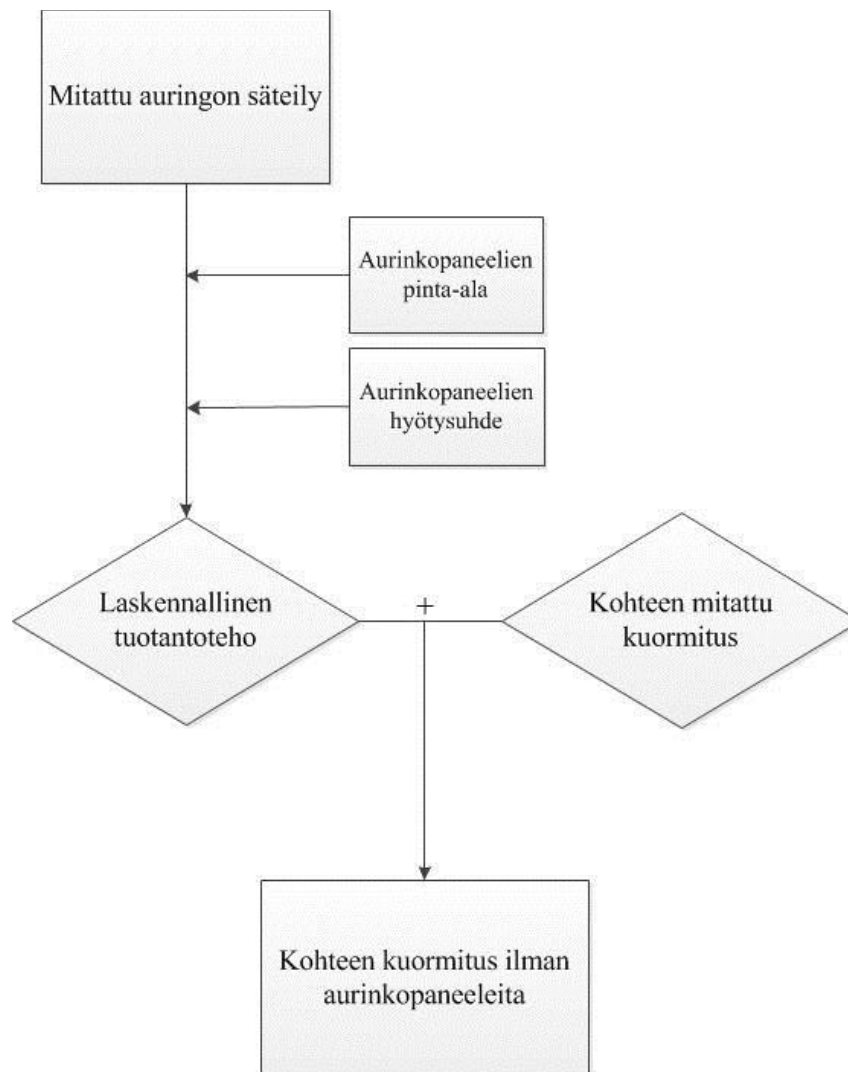
Aurinkopaneelien tapauksessa mallintaminen on hankalaa tuotannon satunnaisuuden vuoksi. Tuotannon satunnaisuus pätee myös pientuulivoimalan tapauksessa. Aurinkopaneelien ja normaalin kuorman summan mallintamisessa tulee sähkökuorman lämpötilariippuvuuden lisäksi ottaa huomioon auringon säteilyn vaikutus aurinkopaneelien tuotantoon. Kuvassa 7.1 on esitetty mitatun kuormituksen muodostuminen peruskuorman ja aurinkopaneelien tapauksessa.



**Kuva 7.1** Mitatun kuormituksen muodostuminen kuorman ja tuotannon tapauksessa

Auringon säteilyä ja paneelien tuotantoa voitaisiin mallintaa laskennallisen aurinkopaneelien tuotantotehon (yksikkö W) avulla, joka laskettaisiin jokaiselle vuoden tunnille erikseen. Tuotantoteho voitaisiin laskea myös vuoden jokaiselle päivälle tai kuukaudelle, jolloin saataisiin karkeampi arvio paneelien vaikutuksesta asiakkaan peruskuormaan. Tuotantotehon laskemiseen käytettäisiin asiakkaan sijainnin mukaista

auringon säteilydataa/-intensiteettiä ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sekä aurinkopaneelien pinta-alaa ja hyötysuhdetta. Näiden parametrien avulla saadaan arvio paneelien tuottamasta energiasta. Laskennassa voitaisiin huomioida myös esimerkiksi paneelien kallistuskulma sekä pilvisuus, mutta näiden tekijöiden huomioimattomuus ei vaikuta oleellisesti laskennallisen tuotantotehon suuruuteen. Laskentamenetelmässä tuotantoteho lisättäisiin jokaiselle tunnille mitattuun kuormitukseen kuvan 7.1 perusteella, sillä mitattu teho koostuu tuotannon ja peruskuorman erotuksesta. Tällöin saataisiin arvio tilanteesta, jossa asiakkaalla ei ole peruskuorman rinnalla tuotantoa. Tätä peruskuorman arvoa voitaisiin puolestaan tarkastella pelkkää kuormaa sisältävän mittausdatan tavoin. Kuva 7.2 havainnollistaa peruskuormituksen laskemista tilanteessa, jossa kuorman rinnalle on kytketty aurinkopaneeleja.

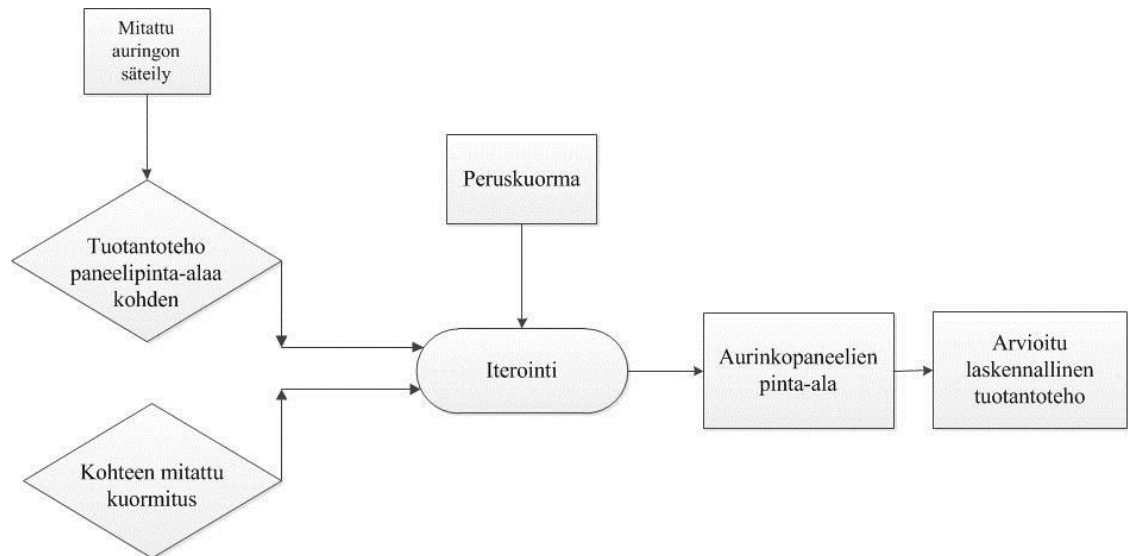


**Kuva 7.2** Peruskuorman laskeminen laskennallisen tuotantotehon avulla

Auringon säteilyn määrää on kuitenkin vaikeaa arvioida useita päiviä eteenpäin, joten säteilyn ja paneelien tuotannon mallintamisessa tulisi käyttää pitkän ajan keskiarvoja. Keskiarvoistamalla edellisten vuosien säteily saadaan karkea arvio tulevasta säteilystä ja aurinkopaneelien tuotannosta. Tällä toimenpiteellä vuosittaisista mittaustiedoista saataisiin vertailukelpoisia ja paneelien vaikutusta kokonaiskuormitukseen voitaisiin arvioida.

Tämän työn luvussa 6.2 tarkasteltu aurinkopaneelien ja peruskuorman yhdistelmä on laskettu lähes kuvan 7.2 osoittamalla tavalla, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Koska tarkastelu perustui puhtaasti teoreettiseen tapaukseen, tutkimuksen pohjalla käytettiin mitattua peruskuormaa, josta vähennettiin aurinkopaneelien laskennallinen tuotantoteho. Näin saatiin arvio tilanteesta, jossa asiakkaalla olisi ollut peruskuorman rinnalla aurinkopaneeleja. Auringon säteilydatana käytettiin mallinnettua säteilyä eikä mittauspisteen sijainti näin ollen ollut tarkasteltavasta kohteesta, vaan sen läheisyydestä. Teoreettisen tarkastelun ideana oli kuitenkin havainnollistaa oman tuotannon vaikutusta asiakkaan kuormituskäyttäytymiseen. Mikäli tarkasteltavana oli ollut todellinen kohde, tarkastelu olisi voitu tehdä kuvan 7.2 esittämällä tavalla.

Edellä kuvatussa ja kuvan 7.2 havainnollistamassa menetelmässä aurinkopaneelien pinta-ala ja näin ollen myös laskennallinen tuotantoteho olivat tiedossa. Yleensä näin ei kuitenkaan ole, vaan asiakkaasta tiedetään mitatun kuormituksen lisäksi ainoastaan auringon säteilyintensiteetti. Itoimalla voitaisiin kuitenkin selvittää myös paneelien pinta-ala ja näin ollen myös laskennallinen tuotantoteho. Tässä tapauksessa kuormaa ja tuotantoa sisältävää AMR -dataa verrattaisiin pelkästä kuormasta muodostuvaan dataan. Tämä peruskuorma olisi mahdollista saada esimerkiksi omaan tuotantoa edeltävien vuosien mittauksista tai hyödyntämällä klusterointia. Pinta-alan laskennassa käytettävä tuotantoteho olisi tässä tapauksessa muotoa  $W/m^2$  ja se laskettaisiin jokaiselle vuoden tunnille paneelien hyötysuhde huomioiden. Aurinkopaneelien hyötysuhteena käytettäisiin vakioarvoa, sillä hyötysuhteet vaihtelevat melko vähän eri paneelien välillä. Tällaisesta oletuksesta ei laskennan kannalta aiheudu merkittävää virhettä. Paneelipinta-ala iteroitaisiin vastaamaan asiakkaan mitattua kuormitusta. Kuva 7.3 havainnollistaa tätä iterointiprosessia.



**Kuva 7.3** Paneelipinta-alan ja laskennallisen tuotantotehon laskeminen

Laskennallisen tuotantotehon lisäksi mallintamisen vaihtoehtona voisi olla myös klusteroinnin kehittäminen, kuten kuorman ohjauksen tapauksessa. Omaa tuotantoa sisältävät kulutuskohteet luokiteltaisiin omiin klustereihinsa kokonaiskuormituksen perusteella. Tässä vaihtoehdossa on kuitenkin ongelmana luokitteluperusteet. Omalla tuotannolla varustetut kohteet voidaan luokitella ainakin kolmella eri tavalla: paneelien koon, kokonaiskuormituksen (AMR -mittauksen) tai verkkoon syötetyn tehon perusteella. Lisäksi klusteroinnissa tulisi huomioida myös asiakkaan lämmitystapa. Klusteroinnin seurauksena samassa luokassa voisi olla usean eri paneelipinta-alan omaavia asiakkaita, joiden AMR -mittarin mittaama kokonaiskulutus olisi sama. Toisaalta luokassa voi olla eri paneelilaisia kohteita, joiden verkkoon päin syöttämä energia on samaa luokkaa. Lisäksi muuttujien määrän lisääntyminen vaikeuttaa klusteroinnin hallintaa, sillä erilaisten kombinaatioiden määrä kasvaa.

Aurinkopaneelien rinnalle kytkettävä sähkövarasto monimutkaistaa paneelien mallinnusta entisestään. Laskennallisen tuotantotehon lisäksi mallia luodessa tarvitaan tieto käytettävän akuston varastoimiskapasiteetista. Lisäksi tulisi huomioida akuston lataus- ja purkusykli eri tilanteissa. Esimerkiksi joissain tilanteissa tuotannon ylittäessä kulutuksen akusto on täynnä ja ylimääräinen energia syötetään verkkoon. Yksiselitteistä korjauskerrointa akun tapauksessa ei ole järkevää luoda heti tällaisten asiakkaiden yleistyessä, vaan asiakkaiden uudelleen ryhmittely, uusien klusterien luominen, olisi järkevin ratkaisu. Uuden mallin ja uusien korjausparametrien luominen on kuitenkin tulevaisuudessa tällaisten asiakkaiden yleistyessä potentiaalinen vaihtoehto, sillä vertailtavia asiakkaita on enemmän ja mittaustietoa on saatavilla pidemmältä ajanjaksolta.

Yhteenvedon aurinkopaneelien mallintamisesta voidaan sanoa, että mitä enemmän toiminnallisuuksia peruskuorman rinnalle kytketään, sitä hankalammaksi tällaisten

kohteiden mallintaminen tulee. Lisäksi luotettavien ennusteiden luomisessa tullaan tarvitsemaan enemmän informaatiota asiakkaalta itseltään, sillä pelkkä AMR -mittaus ei pelkästään tule riittämään. Esimerkiksi aurinkopaneelien ja sähkövaraston tapauksessa mallintamisesta tulee lähes mahdotonta, jos varaston kokoa ja lataus-purkaus -sykliä ei tiedetä. Ratkaisuna näihin ongelmiin voidaan pitää mittausten lisäämistä AMR -mittarin rinnalle. Tällä hetkellä esimerkiksi Saksassa kotitalouksien yhteydessä olevien aurinkopaneelien tuotantoa mitataan, sillä asiakkailla on syöttötariffin seurauksena mahdollisuus myydä paneelien tuottamaa sähköä verkkoyhtiölle. Mikäli aurinkopaneelien tuotantoa ja sähkövaraston lataustilannetta voitaisiin mitata myös Suomessa, kuormitusmallien ja -ennusteiden rakentaminen tällaisille sähkön käyttäjille helpottuisi merkittävästi.

## 8 YHTEENVETO

Älykkäät sähköverkot mahdollistavat uudenlaisia toiminnallisuuksia yksittäisille sähkön käyttäjille. Tulevaisuudessa asiakkaiden energiamittauksesta huolehtivat AMR-mittarit eivät mittaa ainoastaan kulutuskohteen peruskuormaa, vaan esimerkiksi kuorman ja tuotannon tai kuorman ja kysynnän jouston summaa. Lisäksi sähköautojen yleistyminen lähivuosikymmeninä muuttaa sähkön kulutustottumuksia. Näiden toiminnallisuuksien lisääntymisen seurauksena kuormien ennustaminen nykyisillä kuormitusmalleilla vaikeutuu ja mallien uudistamistarve lisääntyy.

Nykyiset kuormitusmallit on muodostettu oletuksella, ettei sähkön käyttäjillä ole peruskuorman lisäksi muita kulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Näissä malleissa huomioidaan ulkolämpötilan vaikutukset sähkökuormiin, jolloin eri vuosien kuormitustiedoista saadaan vertailukelpoisia. Kuormitusmalleilla pyritään ennustamaan tulevaa sähkökuormaa mahdollisimman tarkasti, etenkin verkon huippukuormituksen osalta. Huippukuormien ajankohtien ennustaminen on verkon kannalta tärkeää, jotta niihin osataan varautua. Tulevaisuudessa pelkän ulkolämpötilan vaikutuksen huomioiminen ei kuitenkaan riitä ja tarve uudistaa nykyisiä kuormitusmalleja lähivuosien aikana kasvaa. Kysynnän jouston ja oman tuotannon aiheuttamat muutokset kokonaiskuormituksessa näkyvät sekä kuormitus- että pysyvyyskäyrissä.

Kysynnän jouston vaikutuksia asiakkaan kuormitukseen tarkasteltiin tehokaistan ja spot -ohjauksen avulla. Tehokaistaan perustuvalla kuorman ohjauksella asiakkaan sähkön kulutus pyrittiin pitämään tietyn tehorajan alapuolella. Kulutuksen ylitettyä tehorajan ohjattavat osakuormat kytkeytyivät pois prioriteettijärjestyksessä ja palautuivat takaisin kulutuksen alitettua asetetun hystereesirajan. Tarkasteltavalle asiakkaalle muodostettiin yksilöllinen kuormitusmalli, jotta tehokaistan ja spot -ohjauksen vaikutuksia voitiin vertailla ohjaamattomien vuosien vastaavien kuukausien kanssa. Tarkasteltavalla asiakkaalla myös aiempien vuosien kuormitukset olivat vaihdelleet melko voimakkaasti ja tehokaistaohjauksen vaikutukset olivat vaikeasti havaittavissa. Spot -hintaohjatun lämminvesivaraajan tapauksessa ohjaukset kuitenkin erottuivat selkeästi kuormituskäyristä. Halvimman sähkön aikaan päälle kytketyn lämminvesivaraajan siirtyminen muutamilla tunneilla eteenpäin näkyy selkeästi asiakkaalle muodostetuissa yksilöllisissä kuormituskäyrissä. Tätä siirtymää ei nykyisillä kuormitusmalleilla pystytä ennustamaan.

Kuormituskäyrien lisäksi kuormien ohjaus vaikutti asiakkaan pysyvyyskäyriin. Pysyvyyskäyrissä huipputehojen määrä väheni kuorman ohjauksen seurauksena. Lisäksi



kuormien palauttamisen ajankohta näkyy kumpareena pysyvyyskäyrässä hystereesirajan kohdalla. Tehokaistaohjauksella siis saatiin toivottu, huipputehoja vähentävä vaikutus kuormitukseen. Tehokaistaohjauksessa on kuitenkin vielä kehitettävää.

Kuorman ohjauksen lisäksi oman tuotannon liittäminen peruskuorman rinnalle vaikuttaa pysyvyyskäyrien muotoon merkittävästi. Kuorman ohjauksen tarkastelusta poiketen aurinkopaneelien vaikutuksen tarkastelu oli puhtaasti teoreettinen, mallinnettuihin auringon säteilytietoihin perustuva. Paneelien tuotannon vaikutus kokonaiskuormitukseen etenkin kesäaikaan on merkittävä. Ilman sähkövarastoa 20 m<sup>2</sup>:n paneeleilla voidaan kattaa noin 40 % tarkasteltavan asiakkaan kokonaiskulutuksesta kesäkuussa. Huippukuormiin paneeleilla ei kuitenkaan pystytä vaikuttamaan tarkasteltavan asiakkaan kulutushuippujen sijoittuessa yöaikaan. Lisäksi kesäkuussa paneelit syöttävät merkittävän määrän energiaa verkkoon. Myös maaliskuu- ja lokakuussa paneelien tuotanto vaikuttaa kuormitukseen matalilla tehoilla, mutta verkkoon syöttöä ei juuri ole. Kytkemällä paneelien rinnalle sähkövarasto, akusto, tilanne muuttuu etenkin kesäaikaan merkittävästi. Varastointikapasiteetiltaan 10 kWh:n akustolla paneelien tuottamasta energiasta lähes kaikki pystyttään hyödyntämään asiakkaan omiin tarpeisiin myös kesäaikaan ja verkkoon syötetty teho vähenee huomattavasti. Kyseisessä kohteessa 10 kWh:n akusto on aivan riittävä, sillä suuremmalla akulla ei saada merkittävää lisähyötyä suhteessa akuston hintaan.

Kuormitusmallien kannalta uudet toiminnallisuudet hankaloittavat ennusteiden luomista. Kysynnän jouston liittäminen osaksi asiakkaan kuormitusta muuttaa muun muassa huippukuormien ajankohtia. Oman tuotannon, esimerkiksi aurinkopaneelien, tapauksessa AMR -mittauksesta saatava kuormitustieto koostuu sähkökuormasta sekä auringon säteilystä riippuvasta tuotannosta. Lisäksi tällaisessa kohteessa voi olla sähkövarasto, joka vaikuttaa merkittävästi mitattuun kuormitukseen. Nämä tekijät tulee huomioida uusia kuormitusmalleja rakennettaessa. Kuormien ohjauksen tapauksessa asiakkaiden uudelleen ryhmittely olisi tällä hetkellä järkevin ratkaisu, sillä tehokaistaohjauksen perusteella kuorman ohjauksen vaikutus kuormituskäyriin voidaan selittää kulutuksen vuosittaisella vaihtelulla. Spot -ohjausta voitaisiin puolestaan mallintaa vaihtoehtoisesti myös omalla sähkön hintaan perustuvalla parametrilla.

Aurinkopaneelien tapauksessa uudelleen ryhmittelyn vaihtoehtona olisi laskennallisen aurinkopaneelien tuotantotehon mallintaminen. Mallintamisessa huomioitaisiin auringon säteilyn vaikutus paneelien tuotantoon ja asiakkaan kokonaiskuormitukseen. Aurinkopaneelien tapauksessa asiakkaiden ryhmittely ja ryhmien hallinta on merkittävästi vaikeampaa kuin kuorman ohjauksen tapauksessa muuttujien ja niiden eri kombinaatioiden määrän ollessa suurempi. Yhteenvetona aurinkopaneelien mallintamisesta voidaankin sanoa, että jossain vaiheessa mallintamisessa tulee vastaan raja, jolloin muuttujia on liian paljon. Tällaisessa tilanteessa kuormitusmallien rakentamista varten tarvitaan asiakkaalta mittaustieto kokonaiskuormituksen lisäksi myös paneelien tuotannosta sekä mahdollisen sähkövaraston lataustilanteesta.

## LÄHTEET

- Albadi M. H., El-Saadany E. F. 2008. A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research* 78 (2008). s.1989-1996
- Belonogova N., Lassila J., Partanen J. 2010. Effects of demand response on the distribution company business. *Nordic Conference on Electricity Distribution System Management and Development Aalborg, Denmark, 6-7 September 2010*. 17 s.
- Capehart B. L. 2007. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology - 3 Volume Set (Print Version)*. CRC Press. s. 279-285
- Cowan K., Daim T. 2012. Integrated Technology Roadmap Development Process: Creating Smart Grid Roadmaps to Meet Regional Technology Planning Needs in Oregon and the Pacific Northwest. *Technology Management for Emerging Technologies (PICMET), 2012 Proceedings of PICMET '12*. 15 s.
- Energiateollisuus ry. 2010. Sähkötoimitusehdot. 16 s.
- Energiateollisuus ry. 2011. Verkostosuositus YA9:09, Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. 17 s.
- Energiateollisuus ry. 2012. Älykäs verkko. [WWW] saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>. Viitattu 31.10.2012
- Goetzberger A., Hoffmann V. U. 2005. *Photovoltaic solar energy generation*. Springer. 232 s.
- Grip K. 2012. Aurinkosähköteknologian tulevaisuudennäkymät. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto. 27 s.
- Luque A., Hegedus S. 2003. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley. 1138 s.
- Jalonen M., Ruska M., Lehtonen M. 2003. *Kuormitustutkimus 2003. Projektiraportti*. VTT. 79 s.
- Jenkins N., Ekanayake J. B., Strbac G. 2010. *Distributed generation*. IET. 278 s.

- Kauppinen M. 2011. Utilizing AMR in network business. VTT Load and response modelling workshop in project SGEM 10.11.2011. s.10–13
- Koponen P. 2012. Short term load forecasting model based on smart metering data. IEEE SG-TEP2012, Nuremberg, Germany, Dec 3-4 2012. 4 s.
- Koreneff G. 2010. Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa. VTT. 39 s.
- Lakervi E., Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Otatieto. 284 s.
- LUT. 2012. Jakeluverkkoyhtiöiden tariffirakenteiden kehitysmahdollisuudet. Tutkimusraportti. 89 s.
- Motiva. 2012. Opas sähkön pientuottajalle. 40 s.
- Mutanen A. 2008. Sähkönjakeluverkon tilaestimoinnin täydentäminen kaukoluettavilla mittauksilla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 119 s.
- Mutanen A. 2010. Customer classification and load profiling based on AMR measurements. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. 37 s.
- Rautiainen A., Repo S., Järventausta P., Mutanen A., Vuorilehto K., Jalkanen K. 2012. Statistical Charging Load Modeling of PHEVs in Electricity Distribution Networks Using National Travel Survey Datas. IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 3, No. 4, December 2012. s.1650-1659
- Ritonummi T., Matikainen M. 2008. Sähkön kysyntäjouaston edistäminen. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja: Energia ja ilmasto 15/2008. 102 s.
- Saarinen E. 2013. Home energy management system in enabling power based network tariff. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 99 s.
- Sallam Abdelhay A., Malik Om P. 2011. Electric distribution systems, John Wiley & Sons. 576 s.
- SENER Sähköenergialiitto ry. 1992. Sähkön käytön kuormitustutkimus. 172 s.
- Seppälä A. 1996. Load research and load estimation in electricity distribution. VTT Publications 289. 137 s.
- Short T. A. 2003. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press. luku 14
- SoDa, Solar Energy Services for Professionals. 2013. [WWW] saatavissa: [http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xml\\_descript=hc3v2\\_invoke\\_hour\\_incl\\_demo.xml#parameters](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=hc3v2_invoke_hour_incl_demo.xml#parameters). Viitattu 8.4.2013

Suomen Tuuliatlas. 2013. [WWW] saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>. Viitattu 8.4.2013

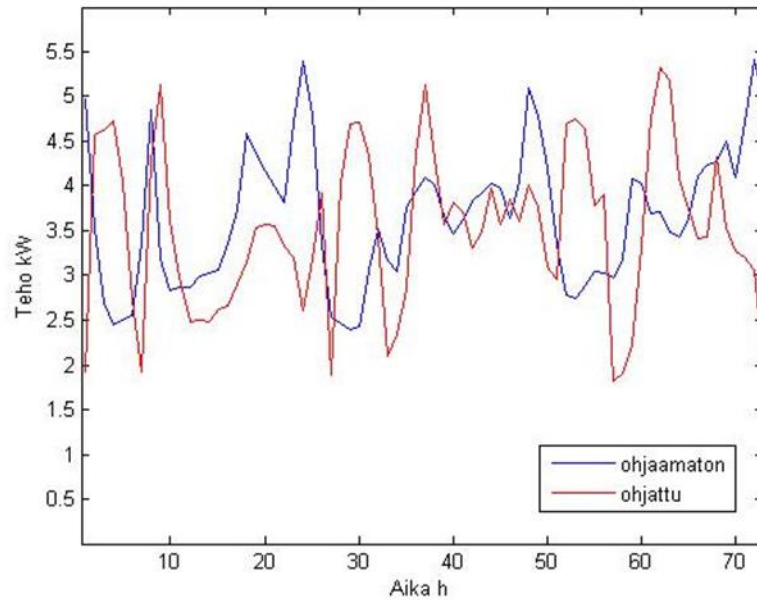
Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2009. Älykkäät sähkömittarit käyttöön Suomessa: Kotitalouksille jopa reaaliaikaista tietoa omasta sähkönkäytöstä. [WWW] saatavissa: <http://valtioneuvosto.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tiedote/en.jsp?oid=253101>. Viitattu 31.10.2012

Valtari J. 2012. SGEM Highlights. Kalvosarja. CLEEN. 39 s.

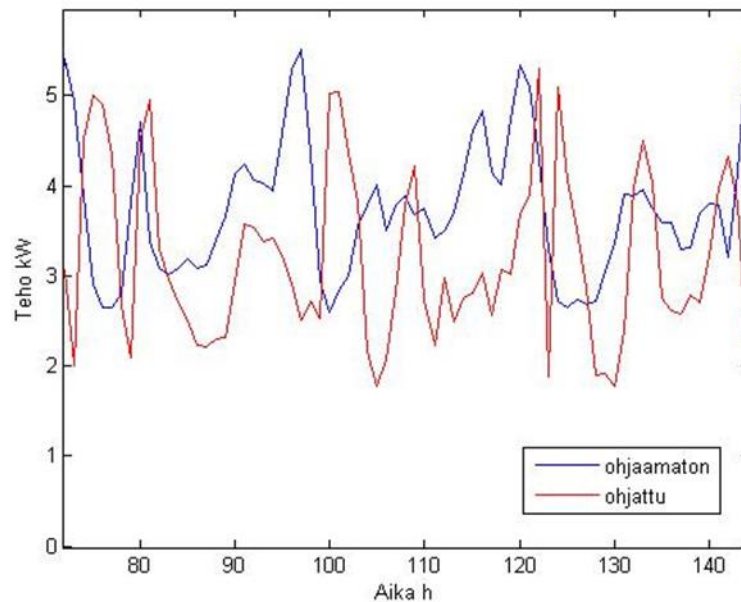
## LIITE 1: KUORMITUSKÄYRÄT

Kuvissa on yhdistetty ohjaamattomat vuodet 2010–2012 siniseksi käyräksi, ja punainen käyrä edustaa ohjattua vuotta 2013.

Tammikuu

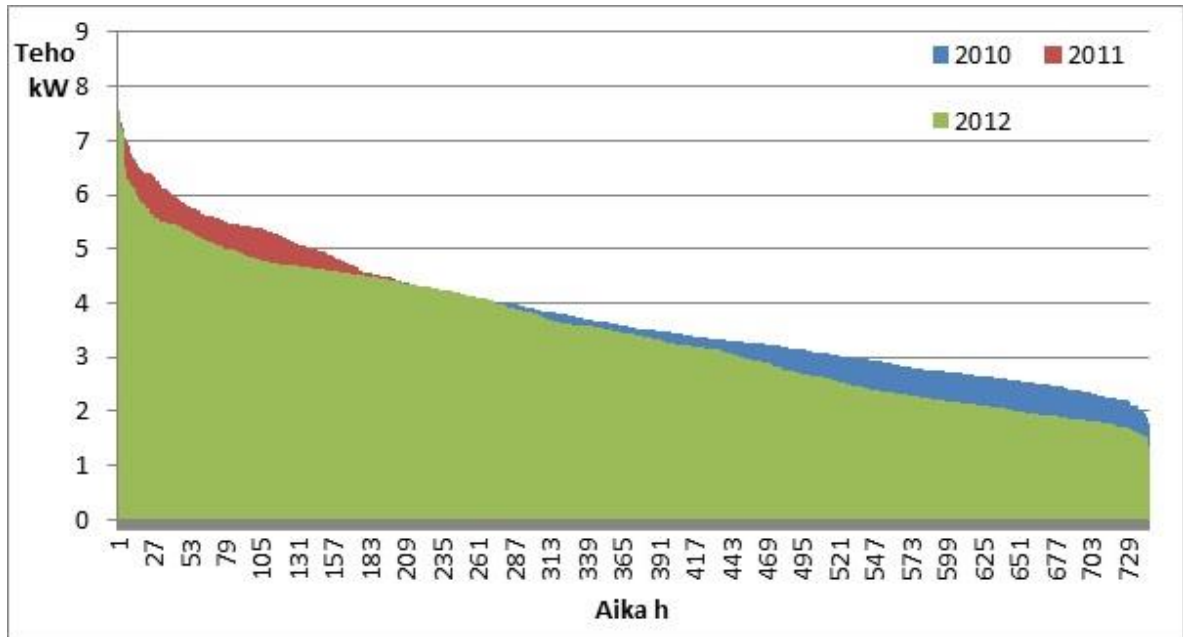


Helmikuu

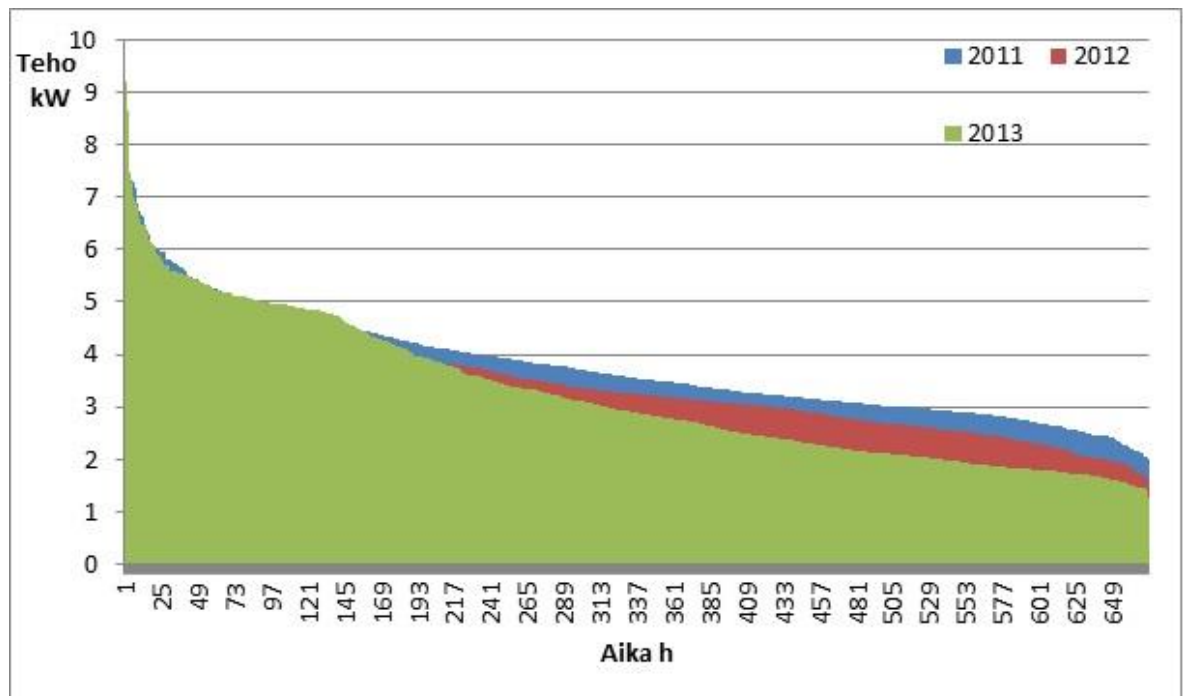


## LIITE 2: LÄMPÖTILAKORJATUT PYSYVYYSKÄYRÄT

Joulukuun pysyvyyskäyrät 2010–2012



Helmikuun pysyvyyskäyrät 2011–2013



### Joulu-helmikuun pysyvyyskäyrät 2010–2013

